



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

**Influencia del crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz en el
nivel de riesgo frente a peligros de origen glaciar**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Ciencias Ambientales con mención en
Control de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental

AUTOR

Ricardo Ray VILLANUEVA RAMÍREZ

ASESOR

Mg. Carlos DEL VALLE JURADO

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Villanueva, R. (2021). *Influencia del crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz en el nivel de riesgo frente a peligros de origen glaciar*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS

Código ORCID del autor	0000-0001-6049-2906
DNI o pasaporte del autor	31670461
Código ORCID del asesor	0000-0002-3040-1396
DNI o pasaporte del asesor	10266187
Grupo de investigación	“__”
Agencia financiadora	“__”
Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación	Huaraz, Ancash, Perú Latitud 9°31'48.63"S Longitud 77°31'44.18"O
Año o años que abarcó la investigación	2018-2020
Disciplinas OCDE	Ciencias del Medio Ambiente http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima, a los cinco días del mes de febrero del año 2021, siendo las 10:00 horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000023-2021-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 25 de enero del 2021, con la finalidad de evaluar la sustentación virtual al amparo de la Directiva de la UNMSM aprobada con Resolución Rectoral N°01357-R-20 de la siguiente tesis:

TITULO

**«INFLUENCIA DEL CRECIMIENTO URBANO DE LA CIUDAD DE HUARAZ EN EL NIVEL DE RIESGO
FRENTE A PELIGROS DE ORIGEN GLACIAR»**

Que, presenta el Bach. **RICARDO RAY VILLANUEVA RAMÍREZ**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES CON MENCIÓN EN CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL**.

El Miembro del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° 08798-FIGMMG-2014 del 05 de diciembre del 2014, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente en conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

MUY BUENO 18

Habiendo sido aprobada la sustentación virtual de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES CON MENCIÓN EN CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL** al Bach. **RICARDO RAY VILLANUEVA RAMÍREZ**.

Siendo las 11:00 horas, se dio por concluido al acto académico.



Firmado digitalmente por CABRERA
CARRANZA Carlos Francisco FAU
20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 12.02.2021 18:01:32 -05:00

DR. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA
Presidente

MG. JOHANS ALEXANDERS ARICA GUTIERREZ
Miembro

MG. SANTIAGO MAYOR PASTOR
Miembro



Firmado digitalmente por DEL VALLE
JURADO Carlos FAU 20148092282
soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 03.03.2021 08:01:51 -05:00

MG. CARLOS DEL VALLE JURADO
Asesor

DEDICATORIA

A mi familia.

AGRADECIMIENTO

A Olguita, mi esposa, por su apoyo y paciencia. A Celinda y Marco, mis padres, por su ejemplo.

Al Instituto Geográfico Nacional – IGN en la persona del Cmdt. EP Víctor Augusto Huamán Maguiña, al Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas – AEGL-ANA en la persona del Ing. Alejo Cochachin Rapré, al Arq. Steven A. Wegner, a la Ing. Karen Price Ríos de CARE Perú y al Bibl. Gíber García Álamo de la Asociación Waras.

A mi asesor el Mag. Carlos del Valle Jurado y a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM.

Al Concejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica – CONCYTEC.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	01
SUMMARY	02

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática	03-04
1.2. Formulación del Problema	05
1.2.1. <i>Problema General</i>	05
1.2.2. <i>Problemas Específicos</i>	05
1.3. Justificación Teórica.....	05
1.4. Justificación Práctica.....	06-07
1.5. Objetivos	07
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	07
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	07

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Filosófico y Epistemológico de la Investigación.....	08-09
2.2. Antecedentes de la Investigación	09-18
2.2.1. <i>Antecedentes Internacionales</i>	10-14
2.2.2. <i>Antecedentes nacionales</i>	14-16
2.2.3. <i>Antecedentes locales</i>	16-18
2.3. Bases Teóricas	18-55
2.3.1. <i>La criósfera y los glaciares</i>	18-39
2.3.1.1. <i>Definición y extensión</i>	18-20
2.3.1.2. <i>Cambio global en la criósfera</i>	20-24
2.3.1.3. <i>Cambios en los glaciares peruanos</i>	24-27
2.3.1.4. <i>La Cordillera Blanca</i>	28-30
2.3.1.5. <i>Peligros de origen glaciar</i>	30-35
2.3.1.6. <i>Peligro por aluvión en Huaraz</i>	35-39
2.3.2. <i>La ciudad de Huaraz</i>	40-50
2.3.2.1. <i>Reseña histórica</i>	40-41

2.3.2.2.	<i>Crecimiento urbano</i>	41-44
2.3.2.3.	<i>Vulnerabilidad y riesgo frente a peligros de origen glaciar</i>	44-47
2.3.2.4.	<i>Evaluación del riesgo</i>	48-50
2.3.3.	<i>Geomática aplicada a la evaluación de riesgos de origen glaciar</i>	51-55
2.4.	Marco Conceptual	56-57

CAPITULO 3: METODOLOGÍA

3.1.	Ámbito	58
3.2.	Escala y sistema de referencia espacial	58-59
3.3.	Hipótesis General	60
3.4.	Hipótesis Específicas	60
3.5.	Identificación de Variables	61
3.6.	Operacionalización de Variables	62
3.7.	Matriz de Consistencia	63
3.8.	Tipo y Diseño de Investigación	64
3.9.	Unidad de Análisis	64
3.10.	Población de Estudio	64
3.11.	Tamaño y Selección de la Muestra	64
3.12.	Técnicas de Recolección de Datos	64-67
3.12.1.	<i>Variable Dependiente: Riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente a un aluvión de origen glaciar</i>	64-65
3.12.2.	<i>Variable Independiente: Vulnerabilidad de la población de la ciudad de Huaraz debida al crecimiento urbano desde el año 1941 hasta el año 2018</i>	65-66
3.12.3.	<i>Variable Independiente: Peligro de ocurrencia un aluvión de origen glaciar</i>	66-67
3.13.	Análisis e Interpretación de la Información	67-69
3.13.1.	<i>Variable Dependiente: Riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente a un aluvión de origen glaciar</i>	67
3.13.2.	<i>Variable Independiente: Vulnerabilidad de la población de la ciudad de Huaraz debida al crecimiento urbano desde el año 1941 hasta el año 2018</i>	68-69

3.13.3. <i>Variable Independiente: Peligro de ocurrencia un aluvión de origen glaciar</i>	69
3.14. Técnicas empleadas	70-88
3.14.1. <i>Corrección geométrica</i>	70-72
3.14.2. <i>Interpretación de imágenes</i>	73-74
3.14.3. <i>Medición de la distribución geográfica</i>	74-76
3.14.4. <i>Análisis espacial</i>	76-78
3.14.5. <i>Regresión logística</i>	78-81
3.14.6. <i>Evaluación Multicriterio (EMC)</i>	81-88
 CAPITULO 4: ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
4.1. Crecimiento de la ciudad de Huaraz a partir del aluvión de 1941	89-149
4.1.1. <i>Procesamiento de información de sensores remotos</i>	89-103
4.1.2. <i>Evolución y tendencia de crecimiento de la ciudad de Huaraz</i>	103-132
4.1.3. <i>Análisis prospectivo del crecimiento de la ciudad de Huaraz</i>	133-149
4.2. Riesgo por aluvión en la ciudad de Huaraz	149-186
4.2.1. <i>Evolución de la exposición en la ciudad de Huaraz frente a un aluvión potencial de origen glaciar</i>	149-159
4.2.2. <i>Peligro por aluvión en la ciudad de Huaraz</i>	160-170
4.2.3. <i>Evolución del riesgo por aluvión en la ciudad de Huaraz</i>	170-186
CONCLUSIONES	187-191
RECOMENDACIONES	192
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193-196
ANEXOS	197-215

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Pág.
<i>Cuadro 1</i>	Cambios en la temperatura global en superficie.	22
<i>Cuadro 2</i>	Inventario de glaciares al año 2016.	27
<i>Cuadro 3</i>	Identificación de variables	61
<i>Cuadro 4</i>	Operacionalización de variables	62
<i>Cuadro 5</i>	Matriz de consistencia	63
<i>Cuadro 6</i>	Tabla de contingencia	80
<i>Cuadro 7</i>	Matriz recíproca de comparación por pares	86
<i>Cuadro 8</i>	Imágenes remotas empleadas	89
<i>Cuadro 9</i>	Período entre imágenes	90
<i>Cuadro 10</i>	Puntos de verificación de coordenadas para la imagen del año 2018 en base al Plano Básico de Huaraz	95-96
<i>Cuadro 11</i>	Evolución del área urbana/poblada en la ciudad de Huaraz en la zona de análisis.	108
<i>Cuadro 12</i>	Número de puntos aleatorios generados para cada año de análisis.	112
<i>Cuadro 13</i>	Evolución anual de los centros medios.	112
<i>Cuadro 14</i>	Evolución anual de las elipses de desviación estándar.	114
<i>Cuadro 15</i>	Distribución espacial de la dirección con respecto al centro medio global en la zona de análisis	117
<i>Cuadro 16</i>	Evolución del crecimiento de áreas urbanas/pobladas en relación a su dirección con respecto al centro medio global	119
<i>Cuadro 17</i>	Distribución espacial de la distancia con respecto al centro medio global en la zona de análisis.	122
<i>Cuadro 18</i>	Evolución del crecimiento de áreas urbanas/pobladas en relación a su distancia con respecto al centro medio global	123
<i>Cuadro 19</i>	Distribución espacial de la altitud con en la zona de análisis.	124
<i>Cuadro 20</i>	Evolución del crecimiento de áreas urbanas/pobladas en relación a su altitud	127
<i>Cuadro 21</i>	Distribución espacial de la pendiente en la zona de análisis	129
<i>Cuadro 22</i>	Evolución del crecimiento de áreas urbanas/pobladas en relación a su pendiente	130
<i>Cuadro 23</i>	Coeficientes de correlación de Pearson para las variables empleadas en la regresión logística	133
<i>Cuadro 24</i>	Coeficientes de regresión individuales	134
<i>Cuadro 25</i>	Estadísticas de regresión	134

<i>Cuadro 26</i>	Tabla ajustada de contingencia de la clasificación (umbral de corte = 0.4167)	134
<i>Cuadro 27</i>	Distribución espacial de la probabilidad de crecimiento urbano en la zona de análisis	138
<i>Cuadro 28</i>	Estandarización continua (fuzzy) de los factores empleados para la EMC.	143
<i>Cuadro 29</i>	Ponderación de los factores mediante AHP	144
<i>Cuadro 30</i>	Peso relativo de cada factor	144
<i>Cuadro 31</i>	Distribución espacial de la idoneidad/potencial de admitir nuevas áreas urbanas/pobladas en la zona de análisis	146
<i>Cuadro 32</i>	Evolución del área urbana/poblada en la zona aluviónica.	155
<i>Cuadro 33</i>	Distribución espacial de la probabilidad de crecimiento urbano en la zona aluviónica	157
<i>Cuadro 34</i>	Distribución espacial de la idoneidad/potencial de admitir nuevas áreas urbanas/pobladas en la zona de aluviónica	158
<i>Cuadro 35</i>	Ratio anual de crecimiento de áreas urbanas/pobladas en la zona aluviónica.	159
<i>Cuadro 36</i>	Distribución espacial de los niveles de peligro del mapa elaborado por la Municipalidad Provincial de Huaraz el año 2004.	162
<i>Cuadro 37</i>	Distribución espacial de los niveles de peligro del mapa elaborado por el proyecto HIMAP - IMACC el año 2014.	164
<i>Cuadro 38</i>	Distribución espacial de los niveles de peligro del mapa elaborado por el proyecto GLACIARES+ el año 2016.	167
<i>Cuadro 39</i>	Resumen de los aspectos de interés de los mapas de peligro frente a aluvión en la ciudad de Huaraz.	169
<i>Cuadro 40</i>	Áreas con alto nivel de riesgo en la ciudad de Huaraz entre 1948 y 1977	174
<i>Cuadro 41</i>	Distribución espacial de los niveles de riesgo en la ciudad de Huaraz entre 2001 y 2018	175
<i>Cuadro 42</i>	Criterios de clasificación de los niveles de riesgo en base al modelo de regresión logística	179
<i>Cuadro 43</i>	Cruce de criterios para la clasificación de los niveles de riesgo prospectivo en base al modelo de regresión logística	179
<i>Cuadro 44</i>	Riesgo prospectivo de aluvión en base al modelo de regresión logística	180
<i>Cuadro 45</i>	Criterios de clasificación de los niveles de riesgo en base al modelo de potencial de acogida de nuevas áreas urbanas/pobladas	181
<i>Cuadro 46</i>	Cruce de criterios para la clasificación de los niveles de riesgo prospectivo en base al modelo de potencial de acogida	182
<i>Cuadro 47</i>	Riesgo prospectivo de aluvión en base al modelo de potencial de acogida	183
<i>Cuadro 48</i>	Riesgo prospectivo integrado frente a aluviones	185

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
<i>Figura 1</i>	Distribución de los elementos de la criósfera. Tomado de https://cambioclimaticoglobal.com/criosfer	19
<i>Figura 2</i>	Porcentaje de área y volumen glaciar en capas de hielo y glaciares de montaña. Tomado de Radić y Hock (2010)	20
<i>Figura 3</i>	Anomalías del promedio de temperatura terrestre y oceánica. Tomado de Cambio Climático 2014 Informe de Síntesis. IPCC (2014).	21
<i>Figura 4</i>	Figura 4. Patrón de calentamiento por regiones para la década 2006-2015 versus el período preindustrial. Tomado de <i>Global Warming of 1.5°C. IPCC (2018).</i>	22
<i>Figura 5</i>	Cambios en la temperatura media global en superficie para los modelos climáticos RCP2,6 y RCP8,5. Cambio Climático 2014 Informe de Síntesis. IPCC (2014).	23
<i>Figura 6</i>	Balance de masa acumulativo en m w.e. desde 1930. Tomado de Global Glacier Change Bulletin. WGMS (2017).	23
<i>Figura 7</i>	Variación en la longitud glaciar a nivel mundial. Tomado de A data set of worldwide glacier length fluctuations (2017).	24
<i>Figura 8</i>	Retroceso del glaciar Qori Kalis, cordillera Vilcanota, Cusco. Tomado de https://alchetron.com/Qori-Kalis-Glacier	25
<i>Figura 9</i>	Laguna en formación en el frente del glaciar Pastoruri, cordillera Blanca, Ancash. Fotografía tomada por el autor (2012)	26
<i>Figura 10</i>	Ubicación de la Cordillera Blanca. Elaborado por el autor.	28
<i>Figura 11</i>	Nevado Huascarán 6768 m s.n.m. Fotografía tomada por el autor (2016)	30
<i>Figura 12</i>	Aluvión de Yungay en 1970. Tomado de https://www.actualidadambiental.pe/ancash-glaciares-del-peru-se-imponen-en-exposicion-fotografica-al-aire-libre/	32
<i>Figura 13</i>	Aluvión de 1941 en la ciudad de Huaraz. Tomado de Lo que el Agua se Llevó. Wegner (2014).	33
<i>Figura 14</i>	Ubicación de la laguna Palcacocha. Elaborado por el autor.	34
<i>Figura 15</i>	Situación de la laguna Palcacocha en 1940. Tomado de Lo que el Agua se Llevó. Wegner (2014).	34
<i>Figura 16</i>	Laguna Palcacocha el año 1947 y 2017. Tomado de Lo que el Agua se Llevó. Wegner (2014) y Google Earth.	35
<i>Figura 17</i>	Vulnerabilidad frente a aluviones en Huaraz. Municipalidad Provincial de Huaraz (2004).	36
<i>Figura 18</i>	Modelo de acumulación de flujo – Aluvión de Palcacocha. Tomado de Modelo de Inundación por Potencial Aluvión desde la Laguna Palcacocha Huaraz, Perú (2014).	36
<i>Figura 19</i>	a) Recorrido modelado de los flujos aluviónicos. b) Resultado sobre la acumulación de flujo aluviónico en base a los escenarios (300,000 m³; 750,000 m³; 1.8 millones m³). Tomado de Modelización de cadenas de procesos relacionados a desbordes de lagunas glaciares en la sub-cuenca Quillcay, Cordillera Blanca. Frey (2016).	37

<i>Figura 20</i>	Mapa de peligro frente a aluviones en Huaraz. Municipalidad provincial de Huaraz.	39
<i>Figura 21</i>	Plano del pueblo de Huaraz en 1786. Tomado de Huarás, Historia de un Pueblo en Transformación (Alba, 2017).	40
<i>Figura 22</i>	Plaza de Armas de la ciudad de Huaraz el año 1910. Tomado de https://www.academia.edu/40501501/Huaraz_2012-2022_Plan_de_Development_Urbano	43
<i>Figura 23</i>	Zona de alta vulnerabilidad frente a aluviones en Huaraz. Fotografía tomada por el autor (2019).	46
<i>Figura 24</i>	Mapa de vulnerabilidad ante aluviones en Huaraz, año 2017. Tomado de Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres de la Subcuenca Quillcay 2018-2021.	47
<i>Figura 25</i>	Mapa de riesgo ante aluviones en Huaraz, año 2017. Tomado de Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres de la Subcuenca Quillcay 2018-2021.	50
<i>Figura 26</i>	Ubicación de la ciudad de Huaraz. Elaborado por el autor.	59
<i>Figura 27</i>	Organización de los criterios de interpretación visual de imágenes. Tomado de Teledetección ambiental 2010 (Chuvieco, 2010).	73
<i>Figura 28</i>	Triángulo de decisiones estratégicas y ubicación de WLC. Tomado de IDRISI Selva Manual (Eastman, 2010).	83
<i>Figura 29</i>	Función sigmoideal a) monotónicamente creciente y b) monotónicamente decreciente. Adaptado de IDRISI Selva Manual (Eastman, 2010).	85
<i>Figura 30</i>	Escala de puntajes de comparación para la matriz recíproca. Adaptado de IDRISI Selva Manual (Eastman, 2010).	86
<i>Figura 31</i>	Diagrama de flujo del procesamiento y análisis de la información. Elaborado por el autor.	88
<i>Figura 32</i>	Ubicación de los principales sectores/barrios y centros poblados en la zona de análisis. Adaptado del Plano Básico de la ciudad de Huaraz	92
<i>Figura 33</i>	Distribución de puntos de verificación de coordenadas para la imagen base del año 2018. Elaborado por el autor.	94
<i>Figura 34</i>	Imágenes de los años 2001-2003 y puntos de control empleados en la corrección geométrica. Elaborado por el autor.	97
<i>Figura 35</i>	Imagen DZB1213-500232L005001_a del año 1977. Obtenida de USGS EROS mediante Earth Explorer.	98
<i>Figura 36</i>	Imagen del año 1977 y puntos de control empleados en la corrección geométrica. Elaborado por el autor.	99
<i>Figura 37</i>	Fotografía aérea de 1962 completa y la zona de análisis procesada. Obtenida de IGN.	100
<i>Figura 38</i>	Detalle de los puntos de control para la corrección geométrica en la zona de análisis. Elaborado por el autor.	100
<i>Figura 39</i>	Fotografía aérea 2524-53 de 1948 y puntos de control para la corrección geométrica en la zona de análisis. Obtenida de la ANA-UGRH	101
<i>Figura 40</i>	Fotografía aérea 2524-91 de 1948 y puntos de control para la corrección geométrica en la zona de análisis. Obtenida de la ANA-UGRH	102

<i>Figura 41</i>	Escenas corregidas geoméricamente correspondientes a los años a) 1948, b) 1962, c) 1977, d) 2001 y e) 2018. Elaborado por el autor.	103
<i>Figura 42</i>	a) Detalle aéreo de las edificaciones el año 1948, b) Construcciones de adobe y puente del río Quillcay en 1939. Obtenido de Asociación WARAS http://www.pcca.org.pe/fototeca/show/10	104
<i>Figura 43</i>	Áreas de campamento para acoger a la población desplazada por el terremoto de 1970 a) Nicrupampa b) Villón. Fotografía aérea del 02-julio-1970 facilitada por S. Wegner.	106
<i>Figura 44</i>	Evolución del área urbana/poblada en la ciudad de Huaraz en la zona de análisis. Elaborado por el autor.	108
<i>Figura 45</i>	Crecimiento real y porcentual de la zona urbana/poblada de la ciudad de Huaraz en la zona de análisis. Elaborado por el autor.	109
<i>Figura 46</i>	Evolución del área urbana/poblada de la ciudad de Huaraz en la zona de análisis entre 1948 y 2018. Elaborado por el autor.	110
<i>Figura 47</i>	Evolución visual comparativa del área urbana/poblada de la ciudad de Huaraz en la zona de análisis entre 1948 y 2018. Elaborado por el autor.	111
<i>Figura 48</i>	Vistas de la moderna ciudad de Huaraz el año 2018 a) Núcleo histórico b) Zona aluviónica. Fotografías tomadas por el autor.	111
<i>Figura 49</i>	Evolución estadística espacial del crecimiento de la ciudad de Huaraz mediante centros medios y elipses de desviación estándar. Elaborado por el autor.	113
<i>Figura 50</i>	Detalle de la tendencia en la evolución del área urbana/poblada de la ciudad de Huaraz en la zona de análisis. Elaborado por el autor.	116
<i>Figura 51</i>	Modelo de dirección con respecto al centro medio global. Elaborado por el autor.	117
<i>Figura 52</i>	Distribución espacial de la dirección con respecto al centro medio global. Elaborado por el autor.	118
<i>Figura 53</i>	Áreas de crecimiento urbano/poblado versus dirección con respecto al centro medio global. a) Distribución porcentual anual, b) Incremento relativo al año anterior, c) Distribución porcentual acumulada 1962-2018, d) Incremento relativo al año base 1948. Elaborado por el autor.	119
<i>Figura 54</i>	Modelo de distancia con respecto al centro medio global. Elaborado por el autor.	121
<i>Figura 55</i>	Distribución espacial de la distancia con respecto al centro medio global. Elaborado por el autor.	122
<i>Figura 56</i>	Áreas de crecimiento urbano/poblado versus distancia con respecto al centro medio global. a) Distribución porcentual anual, b) Distribución porcentual acumulada 1962-2018, c) Incremento relativo al año base 1948. Elaborado por el autor.	123
<i>Figura 57</i>	Modelo de elevación digital. Elaborado por el autor en base al DEM ALOS PALSAR AP_27249_FBS_F6990_RT1.	124
<i>Figura 58</i>	Distribución espacial de la altitud en la zona de análisis. Elaborado por el autor.	125
<i>Figura 59</i>	Áreas de crecimiento urbano/poblado versus altitud. a) Distribución porcentual anual, b) Distribución porcentual acumulada 1962-2018, c) Incremento relativo al año base 1948. Elaborado por el autor.	127

<i>Figura 60</i>	Modelo de pendientes en grados. Elaborado por el autor en base al DEM ALOS PALSAR AP_27249_FBS_F6990_RT1.	128
<i>Figura 61</i>	Distribución espacial de la pendiente en la zona de análisis. Elaborado por el autor.	129
<i>Figura 62</i>	Áreas de crecimiento urbano/poblado versus pendiente. a) Distribución porcentual anual, b) Distribución porcentual acumulada 1962-2018, c) Incremento relativo al año base 1948. Elaborado por el autor.	130
<i>Figura 63</i>	Modelo de densidad de puntos en las zonas urbanas/pobladas. Elaborado por el autor.	132
<i>Figura 64</i>	Curva de evaluación del modelo de probabilidad de pertenencia a zonas urbanas/pobladas. Elaborado por el autor.	135
<i>Figura 65</i>	Probabilidad de crecimiento urbano en la zona de análisis. Elaborado por el autor.	138
<i>Figura 66</i>	Distribución espacial de la probabilidad de crecimiento urbano en la zona de análisis. Elaborado por el autor.	139
<i>Figura 67</i>	Distribución espacial de la idoneidad o potencial de acogida de nuevas áreas urbanas/pobladas en la zona de análisis. Elaborado por el autor.	145
<i>Figura 68</i>	Distribución de la idoneidad/potencial de admitir nuevas áreas urbanas/pobladas en la zona de análisis. Elaborado por el autor.	146
<i>Figura 69</i>	Zona aluviónica en la zona de análisis reconstruida en base a la fotografía aérea de 1948. Elaborado por el autor.	150
<i>Figura 70</i>	Evolución del área urbana/poblada en la zona aluviónica de la ciudad de Huaraz entre 1948 y 2018. Elaborado por el autor.	151
<i>Figura 71</i>	Zona aluviónica el año 1941. Obtenido de Asociación WARAS http://www.pcca.org.pe/fototeca/show/10	152
<i>Figura 72</i>	Evolución visual comparativa del área urbana/poblada en la zona aluviónica de la ciudad de Huaraz entre 1948 y 2018. Elaborado por el autor.	153
<i>Figura 73</i>	Evolución del área urbana/poblada zona aluviónica. Elaborado por el autor.	155
<i>Figura 74</i>	Crecimiento real y porcentual de la zona urbana/poblada en la zona aluviónica. Elaborado por el autor.	155
<i>Figura 75</i>	Probabilidad de crecimiento urbano en la zona aluviónica. Elaborado por el autor.	156
<i>Figura 76</i>	Distribución espacial de la probabilidad de crecimiento urbano en la zona aluviónica. Elaborado por el autor.	157
<i>Figura 77</i>	Distribución espacial de la idoneidad o potencial de acogida de nuevas áreas urbanas/pobladas en la zona aluviónica. Elaborado por el autor.	158
<i>Figura 78</i>	Distribución de la idoneidad/potencial de admitir nuevas áreas urbanas/pobladas en la zona aluviónica. Elaborado por el autor.	158
<i>Figura 79</i>	Evolución de la ratio anual de crecimiento de áreas urbanas/pobladas en la zona aluviónica. Elaborado por el autor.	159
<i>Figura 80</i>	Mapa de peligro de aluvión elaborado por INDECI el año 2003. Elaborado por el autor.	161
<i>Figura 81</i>	Distribución de los niveles de peligro del mapa elaborado por la Municipalidad Provincial de Huaraz el año 2004. Elaborado por el autor.	162

<i>Figura 82</i>	Corte del mapa de peligro de aluvión elaborado por la Municipalidad Provincial de Huaraz el año 2004. Elaborado por el autor.	163
<i>Figura 83</i>	Distribución de los niveles de peligro del mapa elaborado por el proyecto HIMAP - IMACC el año 2014. Elaborado por el autor.	164
<i>Figura 84</i>	Corte del mapa de peligro de aluvión elaborado por el proyecto HIMAP - IMACC en año 20014. Elaborado por el autor.	165
<i>Figura 85</i>	Distribución de los niveles de peligro del mapa elaborado por el proyecto GLACIARES+ el año 2016. Elaborado por el autor.	167
<i>Figura 86</i>	Corte del mapa de peligro de aluvión elaborado por el proyecto GLACIARES+ el año 2016. Elaborado por el autor.	168
<i>Figura 87</i>	Evolución de los indicadores de dirección de crecimiento urbano en relación al mapa de peligro de aluvión del año 2016. Elaborado por el autor.	172
<i>Figura 88</i>	Evolución de las áreas con alto nivel de riesgo entre 1948 y 1977. Elaborado por el autor.	173
<i>Figura 89</i>	Niveles de riesgo en la ciudad de Huaraz entre 1948 y 1977. Elaborado por el autor.	176
<i>Figura 90</i>	Mapa de riesgo frente a aluviones para el año 2001. Elaborado por el autor.	176
<i>Figura 91</i>	Mapa de riesgo frente a aluviones para el año 2018. Elaborado por el autor.	177
<i>Figura 92</i>	Mapa prospectivo de riesgo frente a aluviones en base al modelo de regresión logística. Elaborado por el autor.	180
<i>Figura 93</i>	Distribución de áreas del modelo de riesgo prospectivo de aluvión en base al modelo de regresión logística. Elaborado por el autor.	180
<i>Figura 94</i>	Mapa prospectivo de riesgo frente a aluviones en base al modelo de potencial de acogida. Elaborado por el autor.	183
<i>Figura 95</i>	Distribución de áreas del modelo de riesgo prospectivo de aluvión en base al modelo de potencial de acogida. Elaborado por el autor.	183
<i>Figura 96</i>	Mapa prospectivo integrado de riesgo frente a aluviones. Elaborado por el autor.	185
<i>Figura 97</i>	Distribución de áreas del mapa de riesgo prospectivo integrado frente a aluviones. Elaborado por el autor.	185
<i>Figura 98</i>	Fotografías de las zonas de riesgo prospectivo por exposición frente a aluviones a) Muy alto riesgo en Nueva Florida y Antaoco b) Riesgo medio y alto en Bellapampa c) Muy alto riesgo en las franjas marginales de los ríos Paria y Auqui. Elaborado por el autor.	186

RESUMEN

El 13 de diciembre de 1941 la ciudad de Huaraz fue parcialmente destruida por un aluvión originado en la laguna Palcacocha ocasionando cuantiosas pérdidas materiales y de miles de vidas humanas. Hasta el año 2018 Huaraz ha crecido mucho ocupando paulatinamente el área que fue afectada por el aluvión de 1941, así como áreas adyacentes expuestas al este creciente peligro debido al severo incremento del volumen de la laguna Palcacocha. Para analizar el crecimiento urbano y urbano marginal de la ciudad se procesaron fotografías aéreas de 1948, 1962 e imágenes satelitales de 1977, 2001 y 2018; todas de alta resolución espacial tomando como referencia espacial un mapa base a escala 1/10,000 elaborado en base al Plano Catastral, obteniendo los polígonos de crecimiento urbano y de áreas pobladas dentro de una zona de análisis. Empleando esta información se analizaron las características y tendencias del crecimiento de la ciudad empleando técnicas estadísticas en sistemas de información geográfica (SIG) como la evolución de los centros medios y elipses de desviación estándar; y su relación con respecto a factores como la dirección de crecimiento y distancia con respecto al centro medio global, altitud y densidad de puntos como factor ficticio de apoyo. Para lograr un análisis prospectivo del crecimiento de la ciudad se ejecutó una regresión logística obteniéndose la probabilidad de crecimiento de nuevas áreas urbanas o pobladas, y una Evaluación Multicriterio (EMC) de la que se obtuvo la capacidad de acogida de nuevas áreas urbanas o pobladas. Empleando técnicas de análisis espacial y SIG se cruzaron los resultados previos con la zona aluviónica y mapa de peligro por aluvión del año 2016 demostrando un crecimiento histórico de la vulnerabilidad por exposición y en consecuencia del nivel de riesgo. Se hizo un análisis prospectivo del riesgo por aluvión en base a los resultados de la regresión logística y la EMC.

SUMMARY

On December 13, 1941, the city of Huaraz was partially destroyed by a flood from Palcacocha lagoon causing substantial material and thousands of human lives losses. Until 2018, Huaraz has grown a lot, gradually occupying the area that was affected by the 1941 flood, as well as adjacent areas exposed to this growing danger due to the severe increase in the volume of the Palcacocha lagoon. To analyze the city urban and marginal urban growth, aerial photographs from 1948, 1962 and satellite images from 1977, 2001 and 2018 were processed; all of high spatial resolution taking as a spatial reference a 1/10,000 scale base map prepared based on the Cadastral Map, obtaining polygons of urban growth and populated areas within an analysis zone. Using this information, the city growth characteristics and trends were analyzed using statistical techniques in geographic information systems (GIS) such as the middle centers and standard deviation ellipses evolution; and its relationship with respect to factors such as the growth direction and distance from the global mean center, altitude and point density as an artificial supporting factor. To achieve a prospective analysis of the city growth, a logistic regression was performed, obtaining the growth probability of new urban or populated areas, and a Multi-Criteria Evaluation (EMC), from which the capacity to host new urban or populated areas was obtained. Using spatial analysis and GIS techniques, previous results were crossed with alluvial zone and 2016 flood hazard, demonstrating a vulnerability historical increase due to exposure and, consequently, of risk level. A prospective flood risk analysis was made based on the results of logistic regression and EMC.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

La ciudad de Huaraz, capital del departamento de Ancash, se ubica en el Callejón de Huaylas a 3,100 m s.n.m, sobre un depósito aluvial en la confluencia de los ríos Santa y Quillcay, este último con origen en las subcuencas de Cojup, Quillcayhuanca y Shallap en la Cordillera Blanca la que registra la mayor incidencia de desastres asociados a procesos geodinámicos externos de origen glaciar a nivel nacional. El 13 de diciembre del año 1941 un aluvión originado por el desborde de la laguna Palcacocha a 23 km al noreste de Huaraz en la cabecera de la quebrada Cojup a 4,562 m s.n.m., una de las tres quebradas que conforman la subcuenca Quillcay, destruyó el nuevo sector del norte de la ciudad de Huaraz ocasionando la muerte de miles de pobladores, así como cuantiosos daños materiales aguas abajo, a lo largo del Callejón de Huaylas (Wegner, 2014).

El año 1974 la Dirección de Glaciología y Seguridad de Lagunas de Electro Perú S.A. construyó un dique de seguridad en la morrena frontal para contener posibles aluviones futuros en base a un volumen estimado en medio millón de metros cúbicos, el año 2016 la Unidad de Glaciología de la ANA calcula un volumen de 17'403,353 m³, es decir se tiene un incremento de 34 veces el volumen de 1974 (INAIGEM, 2018).

El año 2003 se produjo un deslizamiento de la morrena lateral izquierda que contiene la laguna, originando un oleaje que llegó a superar el dique de seguridad sin llegar a destruirlo, produciendo el

enturbiamiento de las aguas del río Paria ocasionando el desabastecimiento para parte de la ciudad de Huaraz durante seis días (INAIGEM, 2018).

No obstante los antecedentes catastróficos originados en la laguna Palcacocha, la población de Huaraz se ha incrementado paulatinamente, en 1941 la población se estimó en 34,998, en 1981 ascendió a 44,810 pobladores, en 1993 se censaron 66,890 habitantes, el año 2007 se contabilizaron 100,930 habitantes y el año 2015 la población superó el número de 120,000 (Population.city, 2019); ocupando densamente las áreas afectadas por el aluvión de 1941 en las que actualmente existen zonas de vivienda, comerciales y de recreación, estimándose en más de 20,000 el número de personas que habitan estas áreas altamente vulnerables. La mala planificación del crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz ha dado lugar a la ocupación paulatina de áreas vulnerables hecho que se espera continúe en los próximos años incrementando la exposición de la población y sus medios de vida a peligros de origen glaciar (INDECI, 2003).

El severo incremento del volumen de la laguna Palcacocha y la existencia de poblaciones expuestas al peligro de aluvión, condicionan un escenario de riesgo que se ve exacerbado con las actuales condiciones de cambio climático que contribuyen a acelerar el retroceso glaciar, el incremento del volumen de las lagunas de origen glaciar y la desestabilización de masas glaciares. La existencia de la falla activa de la Cordillera Blanca a 12 km de la laguna también es un factor potencialmente gatillador de movimientos de masa glaciar (INGEMMET, 2013).

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cuál será la influencia del crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz y la ocupación paulatina de áreas aluviónicas desde el año 1941 hasta el año 2018, sobre el nivel de riesgo de la población frente a un aluvión potencial de origen glaciar?

1.2.2. Problemas Específicos

1. ¿Cómo ha evolucionado espacialmente el crecimiento urbano en la ciudad de Huaraz desde el año 1941 hasta el año 2018, como condición de vulnerabilidad?
2. ¿Cuáles son los niveles de peligro por la ocurrencia de un aluvión de origen glaciar existentes en la ciudad de Huaraz?
3. ¿Cuál es la tendencia en el nivel de riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente al peligro de un aluvión de origen glaciar?

1.3. Justificación Teórica

La presente investigación aportará conocimientos para enriquecer el desarrollo de los estudios sobre riesgos en áreas urbanas y periurbanas en ecosistemas de montaña, sobre todo en aquellas con influencia glaciar. Constituye un aporte para fortalecer la gestión de riesgos, alentando el debate en base a información científica sobre la evolución y perspectivas de los factores de vulnerabilidad y peligro empleando herramientas geomáticas que permiten optimizar la resolución y calidad de los resultados obtenidos fortaleciendo de esta manera a la toma de decisiones para el adecuado uso y ocupación de territorios expuestos a peligros.

1.4. Justificación Práctica

La investigación generará información científica que demuestre que la evolución del crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz viene contribuyendo y continuará contribuyendo a incrementar el riesgo frente al peligro de aluviones de origen glaciar. Los resultados de la investigación consistirán en mapas y modelos cuantitativos sobre la evolución temporal del crecimiento urbano de la ciudad, condiciones de ocupación del territorio, estadísticas sobre la evolución de la población e infraestructura vulnerables y evolución del nivel de riesgo.

Para lograr estos resultados se realizarán análisis multitemporales empleando imágenes satelitales de alta resolución espacial y fotografías aéreas para analizar la evolución del crecimiento urbano de la ciudad, así como las condiciones de ocupación y la infraestructura existente. A través de una búsqueda de información histórica estadística y descriptiva se analizarán las características de ocupación y de la población existente para determinar los niveles de vulnerabilidad. Se emplearán los resultados de estudios realizados por entidades como INAIGEM, la UGRH-ANA, INDECI, la Universidad de Texas y Zúrich sobre peligros de origen glaciar en la subcuenca del río Quillcay. La evolución de los niveles de riesgo asociados al crecimiento de la ciudad de Huaraz se analizará empleando sistemas de información geográfica. El desarrollo de la presente investigación se estima en ocho meses.

Los resultados de la presente investigación serán de utilidad para los tomadores de decisión en la ciudad, municipalidad provincial de Huaraz y distrital de Independencia al proveer información base para la gestión de riesgos, la planificación urbana y el acondicionamiento territorial. También será de interés para INDECI y CENEPRED Ancash, así como al Centro de Operaciones de Emergencia Regional (COER) como entidades directamente involucradas en la gestión de riesgos, no sólo

por la información generada, sino también por la metodología propuesta aplicable a otros territorios con situaciones similares a las de la ciudad de Huaraz.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Determinar la influencia del crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz y la ocupación paulatina de áreas aluviónicas desde el año 1941 hasta el año 2018, sobre el nivel de riesgo de la población frente a un aluvión potencial de origen glaciar.

1.5.2. Objetivos Específicos

1. Analizar la evolución espacial del crecimiento urbano en la ciudad de Huaraz desde el año 1941 hasta el año 2018, como condición de vulnerabilidad.
2. Determinar los niveles de peligro por la ocurrencia de un aluvión de origen glaciar existentes en la ciudad de Huaraz.
3. Estimar las tendencias en el nivel de riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente al peligro de un aluvión de origen glaciar.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Filosófico y Epistemológico de la Investigación

La realidad observada a nivel global, y en particular en los países en vías de desarrollo como el Perú, en la que la exposición de la población a fenómenos naturales potencialmente destructivos se incrementa paulatinamente invita a la reflexión sobre los procesos que le dan origen en primer término. En términos generales es conocido, por lo menos empíricamente, que el asentamiento de las poblaciones no está exento de peligros potenciales, sobre todo en territorios en los que el historial de fenómenos geodinámicos con consecuencias destructivas es denso y reciente tal como sucede en la zona andina, en la Cordillera de los Andes; sin embargo, es un hecho que parte importante de todas las áreas de expansión urbana en las principales ciudades andinas del Perú se presentan condiciones de alta vulnerabilidad y exposición a peligros.

Cabe entonces preguntarse por qué, qué mecanismos operan en la percepción la población y sus autoridades para llegar a configurar escenarios de alto riesgo sin otorgarle mayor relevancia a la potencial pérdida de vidas y propiedad. Al conversar con la población asentada en áreas de alto riesgo suelen escucharse comentarios como “...no tengo a donde más ir...” o “...me moriré pues...” notándose una especie de peligrosa resignación, actitud tal vez asumida por las condiciones de pobreza y desamparo existentes a las que se suma una ineficiente planificación y gestión territorial por parte de las autoridades. En segundo término, y más importante aún, surge la pregunta de qué hacer frente al escenario señalado en un contexto actual en el que se

ha avanzado mucho en aspectos técnicos, normativos e institucionales, sin embargo, con éxitos modestos en la gestión territorial y de riesgos. La generación de conocimiento a partir de evidencia científica, constituye un aporte clave para fortalecer el proceso de transformación de la percepción y consciencia colectiva, sobre todo a nivel de tomadores de decisión.

Históricamente el conocimiento científico ha contribuido en el largo plazo a transformar sociedades completas y pasar de un mundo de mitos arraigados por generaciones en el que lo atávico y lo esotérico imperaba; hacia uno en el que la solución a numerosos problemas de la humanidad ha podido ser lograda. Finalmente, siendo el conocimiento infinito, se inserta en un ciclo permanente de investigación y avances frente al surgimiento de nuevas realidades y retos que llevarán a la humanidad a nuevos horizontes.

2.2. Antecedentes de la Investigación

Los glaciares forman parte de la criósfera terrestre y son fuente de recursos hídricos para las poblaciones, actividades económicas y ecosistemas en sus áreas de influencia, sin embargo, son también origen de peligros por movimientos de masas asociados a su desestabilización y cambios acelerados exacerbados por el actual proceso de cambio climático. El Perú es uno de los países más afectados por los impactos del cambio climático, siendo uno de los principales, la pérdida acelerada de áreas glaciares y la formación de lagunas fenómeno al que se suma la existencia de fuentes de peligros por geodinámica interna.

Muchos son los casos de fenómenos originados en áreas glaciares a nivel mundial y en el Perú, se trata de fenómenos que se convierten en desastres debido a la alta vulnerabilidad de las población e infraestructura sobre todo en países en vías de desarrollo, habiéndose

desarrollado diversas investigaciones orientadas, sobre todo, a contribuir en la planificación territorial, la gestión de riesgos y el establecimiento de medidas de adaptación. A continuación, se citan investigaciones internacionales, nacionales y locales que han abordado temas relacionados al presente trabajo.

2.2.1. Antecedentes Internacionales

- Factores de riesgo de la quebrada Cunduanda sobre las zonas de expansión urbanas de Riobamba. Se trata de una investigación en la que se analizan los factores los factores de riesgo en Cunduanda, una quebrada en la que procesos hidrológicos extremos han ocasionado daños a la población y servicios básicos a nivel urbano y en las zonas de expansión urbana de la ciudad de Riobamba (García, 2018).

Metodológicamente, la investigación emplea un estándar colombiano plasmado en el documento “Metodología de análisis de riesgo, Documento Soporte; Guía para la elaboración de planes de emergencia y contingencia” indicándose como caso aplicado la ciudad de Bogotá. La investigación identifica puntos de muestreo en los que se aplica una encuesta y se analiza el crecimiento urbano mediante fotografías aéreas para determinar su influencia en los niveles de vulnerabilidad (García, 2018). Se concluye que la red de alcantarillado y vía son los servicios más vulnerables. El desconocimiento y limitada preparación de la población en temas de gestión de riesgos es un factor crítico de vulnerabilidad al que se suma el crecimiento de la zona expansión urbana.

- Aplicación de regresión logística basada en SIG para el mapeo de la susceptibilidad de deslizamientos en las montañas Kakuda-Yahuki, Japón Central (Ayalew &

Yamagishi, 2005). La investigación emplea la regresión logística como una alternativa metodológica para evaluar la probabilidad de deslizamientos tomando en consideración variables como la litología, relación pendiente-lecho de roca, alineamientos, gradiente, orientación, elevación y red vial consideradas independientes, siendo la existencia o ausencia de deslizamientos la variable dependiente.

Los resultados de la investigación demuestran que la cercanía a la red vial es la variable que ejerce mayor influencia sobre la incidencia de deslizamientos, seguida de la relación pendiente-lecho de roca y la orientación. Se logró obtener un mapa clasificado en cinco niveles de susceptibilidad en el que el 4.14% del área evaluada presenta una alta susceptibilidad a deslizamientos.

- Modelamiento del patrón de crecimiento urbano usando regresión logística (Nong & Du, 2011). Esta investigación analiza el cambio del uso de tierras hacia un uso urbano en el condado de Jiayu, provincia de Hubei en China. Las variables empleadas para explicar el proceso de urbanización son la densidad poblacional, el valor industrial bruto, el valor agrícola bruto, la distancia al centro económico y las vías principales, y la pendiente. La variable dicotómica dependiente es la existencia de zonas urbanas.

Se realizó una validación estadística empleando información sobre la cobertura urbana y las variables independientes correspondientes al año 2003 obteniéndose una exactitud del 60.5% en las áreas proyectadas como urbanas. Se determinó que la densidad poblacional, la distancia al centro económico, la distancia a las vías y la pendiente tienen una fuerte relación con el crecimiento urbano. Finalmente se aplicó el modelo de regresión para el año 2007 analizándose

la probabilidad de tener verdaderos positivos versus falsos positivos en base a información urbana observada obteniéndose un valor de 0.891 (1 es el valor ideal de ajuste exacto), muy alto, probablemente explicado por la reciente data de los inputs para el modelo (año 2003). Se concluye que la regresión logística facilita el entendimiento de las fuerzas que controlan el cambio en el uso de la tierra.

- Riesgo en el piedemonte del Gran Mendoza por avance urbano. Argentina (López, 2008). El objetivo general de la investigación es analizar la forma y características del crecimiento urbano de la ciudad de Gran Mendoza en Argentina y cómo éste crecimiento mal planificado, que no ha tomado en consideración aspectos físicos y ecológicos, ha dado lugar al establecimiento de zonas urbanas en desmedro del medio natural del ecosistema piedemonte, exponiendo a la población a riesgos asociados a procesos erosivos, escurrimientos y aluviones.

La investigación se desarrolló empleando el método inductivo sistémico partiendo de la elaboración de un prediagnóstico del territorio evaluando variables del ambiente natural (geomorfología, cobertura, pendiente, hidrografía y fallas) y el ambiente antropogénico (uso de suelo, nivel de urbanización, evolución urbana reglamentación y superficies impermeabilizadas). Esta información se emplea para determinar la aptitud para la ocupación de las zonas empleando herramientas como Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Evaluación Multicriterio (EMC).

La investigación concluye que la alteración del terreno natural y la modificación de las áreas de infiltración natural permiten la amortiguación de fenómenos aluvionales en

Gran Mendoza, pero traslada los impactos a territorios aguas abajo y ocasionado la paulatina degradación del ambiente natural del ecosistema piedemonte e incrementando los niveles de riesgo en estas áreas.

- Vulnerabilidad y análisis de riesgo de decisiones en aluviones de origen glaciar. Casos de estudio: subcuenca Quillcay en la Cordillera Blanca en Perú y subcuenca Dudh Koshi en la región del Everest en Nepal (Somos, 2014). El objetivo de la investigación fue la generación de información que permita a las comunidades aguas debajo de la laguna Palcacocha en Perú e Imja en Nepal, entender el nivel de peligro existente relacionado a aluviones, para generar herramientas que permitan a las autoridades evaluar la efectividad de las medidas de reducción de riesgos propuestas. Así mismo, contribuir al incremento de la consciencia sobre este creciente peligro relacionado al derretimiento glaciar y la formación de lagunas.

En base al objetivo de la investigación, fue necesaria la recolección de información de campo sobre las morrenas y estructuras glaciares asociadas a la laguna Imja, para este fin, se empleó un radar de penetración terrestre (GPR), también se realizó una batimetría para conocer el volumen de la laguna. Los resultados de ambas mediciones, así como los datos secundarios obtenidos sobre el relieve y cobertura de la subcuenca aguas abajo, se utilizaron para realizar un modelamiento de la falla del dique y el recorrido de un aluvión.

Para el caso de la laguna Palcacocha, se empleó información secundaria sobre el relieve de la subcuenca (un modelo de elevación digital generado mediante LIDAR), cobertura y volumen de la laguna. A partir de esta información se

realizaron cálculos hidrológicos y se modeló la ruptura del dique y el recorrido de un aluvión detallando información como velocidad, altura del material depositado y tiempo de llegada. Finalmente, el investigador realiza un análisis del nivel de peligro y de vulnerabilidad social en la ciudad de Huaraz. Para los modelamientos se emplearon programas como HEC-RAS y FLO-2D.

La investigación concluye, de manera general, que la información sobre el volumen de las lagunas es crítica para modelar posibles aluviones teniendo en cuenta que los glaciares continúan retrocediendo incrementando el volumen de las lagunas. Concluye también que la reducción sustancial en el nivel de las lagunas es una medida correcta para reducir el nivel de peligro. Otra conclusión señala la existencia de un peligro de aluvión sobre la ciudad de Huaraz, así como poblaciones altamente vulnerables, siendo necesaria la implementación de sistemas de alerta temprana para reducir el nivel de riesgo.

2.2.2. Antecedentes nacionales

- Análisis de vulnerabilidad ante la probable ocurrencia de flujo de detritos en la quebrada Carossio, distrito de Lurigancho-Chosica, Lima-Lima. La investigación se enfoca en el análisis de la vulnerabilidad de las viviendas ubicadas en el cono deyectivo de la quebrada Carossio frente a flujos de detritos ocasionados por lluvias intensas, así como los grados de fragilidad y resiliencia en las dimensiones social y económica.

Los distritos de Lurigancho y Chosica en el departamento de Lima tienen numerosos antecedentes de la ocurrencia de procesos geodinámicos violentos asociados a fenómenos

meteorológicos intensos sobre todo durante el Fenómeno El Niño con impactos sobre la vida e infraestructura. Las numerosas quebradas existentes en estos distritos se activan violentamente frente a lluvias intensas siendo una de ellas la quebrada Carossio donde se han producido flujos de detritos afectando zonas pobladas precariamente debido al crecimiento acelerado y desordenado de la población en zonas urbano marginales (Sánchez, 2018).

Metodológicamente la investigación se basa en el “Manual para la evaluación de riesgo originados por fenómenos naturales 02 versión” del CENEPRED desarrollando cuatro etapas: recopilación de información secundaria, asesoría de expertos, levantamiento de información de campo catastral, sobre suelos y viviendas; y finalmente procesamiento de la información recopilada en función al manual del CENEPRED aplicando técnicas de Evaluación Multicriterio y la escala de SAATY sobre 92 lotes estudiados.

La investigación concluye que el 100% de los lotes es afectado directamente por un flujo de detritos. Se detalla en sus resultados las características que definen la vulnerabilidad de los lotes evaluados resaltando que la mayoría de las viviendas se encuentran en mal estado de conservación y han sido construidas sin asesoramiento. Se evidencia también en los resultados que la población ha sido capacitada en materia de gestión de riesgos y asume una actitud parcialmente previsoras frente al riesgo (Sánchez, 2018).

- Aluvión en el Chicón (Tecsí C. & Tupa R., 2017). El objetivo de la investigación es comprender cómo se forma un conocimiento social a partir de los testimonios, experiencias, efectos y acciones post desastre, frente a aluviones

ocurridos en la subcuenca de Chicón en los años 1697, 1942 y 2010; originados por el glaciar del mismo nombre ubicado en la provincia de Urubamba, departamento de Cusco. La investigación es social y de tipo descriptivo y empleó técnicas de revisión y análisis de documentación periodística histórica, entrevistas y observación directa en la zona afectada por los aluviones.

La investigación concluye que la percepción de la población en la subcuenca Chicón con respecto al origen de los aluviones es inicialmente asociado a poderes sobrenaturales, esto ocurre sobre todo con relación al evento de 1942 que fue catalogado como de gran intensidad. Sobre el evento más reciente ocurrido el año 2010, de menor intensidad, la percepción local asocia la ocurrencia del evento a la reducción de la masa del glaciar Chicón y, de manera sesgada, a los impactos de actividades extractivas como la minería. Pese a los estudios realizados por diversas instituciones y las recomendaciones desarrolladas para la gestión de riesgos, se tiene la percepción de los pobladores de la existencia de una “mano negra”. La investigación señala que sólo después de la intervención de diversas instituciones, y frente al temor de posibles nuevos daños, la población ejecutó acciones para su desplazamiento a zonas seguras.

2.2.3. Antecedentes locales

- La evaluación del riesgo de desastre en la planificación del desarrollo en la ciudad de Huaraz, Ancash (Ministerio de Economía y Finanzas, 2009). La investigación se enfoca en la evaluación del riesgo de desastre en Huaraz frente a antecedentes como el aluvión de 1941 y el terremoto de 1970 con la finalidad de servir de base para la planificación del

desarrollo. La investigación (tesis de Vladimir Roberto Ferro Ameri para optar al grado de Magister) analiza el desarrollo urbano de la ciudad en relación a las condiciones actuales de riesgo originado por una fuerte dinámica geológica al estar ubicada en el cauce del río Quillcay.

Se hace un análisis de la evolución social y económica de la población cuya precaria situación contribuye a incrementar su vulnerabilidad dado su bajo nivel de resiliencia frente a desastres y la fragilidad de sus medios de vida. La investigación determina que el 50% de las viviendas y edificaciones en la ciudad se encuentran en un nivel medio y alto de riesgo por sismo y el 28% frente a una inundación realizando finalmente una valoración económica de las afectaciones.

- Mapeo de peligros originados por aluviones de origen glaciar basado en el modelamiento de cascadas de procesos en la laguna 513, Carhuaz, Perú (Schneider, Huggel, Cochachin, Guillén, & García, 2014). El objetivo de la investigación es evaluar cómo las cadenas de procesos de movimientos de masas pueden ser simuladas integrando diferentes modelos numéricos a fin de desarrollar aproximaciones que permitan la elaboración de mapas de peligro para la gestión de riesgos.

La investigación toma como caso el aluvión ocurrido el 11 de abril del año 2010 en la subcuenca Chucchún, en la provincia de Carhuaz en Ancash, originado por el desborde de la laguna 513 que afectó infraestructura vial, de riego, áreas de cultivo y viviendas. La investigación se basó en el desarrollo de modelos aluvión empleando programas especializados como RAMMS e IBER. La información empleada fue, por un lado, geomática como imágenes satelitales SPOT 5 del

2006, modelos de elevación digital e imágenes de Google Earth del 2003. Por otro lado, se colectó información batimétrica de los años 2007 y 2011, para reconstruir el volumen y la geometría de la laguna glaciar. Los resultados del modelamiento con el programa RAMMS incluyen velocidades y profundidades, parámetros fundamentales para el mapeo de riesgos. Con esta información, se proyectan escenarios de avalanchas de hielo y roca y aluviones y se elabora el mapa de peligros.

La investigación concluye que analizar los aluviones como una cadena de procesos físicos es fundamental, se señala que la calibración de los modelos es necesaria ya que los resultados de un modelo serán insumo para el otro, siendo necesaria la ejecución de muchas iteraciones. El desarrollo de escenarios de aluviones pequeños, medios y grandes es importante como base para el mapa de peligros que emplea sobre todo información sobre velocidades y profundidades de acumulación de materiales. Los resultados del modelamiento deben ser verificados en campo especialmente en áreas topográficamente críticas. La aplicación práctica de los resultados de la investigación se verifica en el uso del mapa de peligros por parte de las autoridades de la ciudad de Carhuaz.

2.3. Bases Teóricas

2.3.1. *La criósfera y los glaciares*

2.3.1.1. *Definición y extensión.*

La criósfera es la parte de la superficie terrestre compuesta por agua en estado sólido cuya extensión varía anualmente debido a la existencia de componentes estacionales y

permanentes. Por su extensión, el principal componente de la criósfera es la cubierta de nieve terrestre, sobre todo, en el Hemisferio Norte. Los hielos continentales y las plataformas de hielo son las de menor extensión y dentro de este grupo se encuentran las pequeñas capas de hielo y glaciares de montaña con 0.74 millones de km² aproximadamente (Barry & Yew Gan, 2011). WGMS (2008) señala que los glaciares, capas de hielo y cuerpos de hielo continental cubren aproximadamente el 10% de la superficie terrestre que corresponde a las tres cuartas partes de las reservas de agua dulce del mundo.

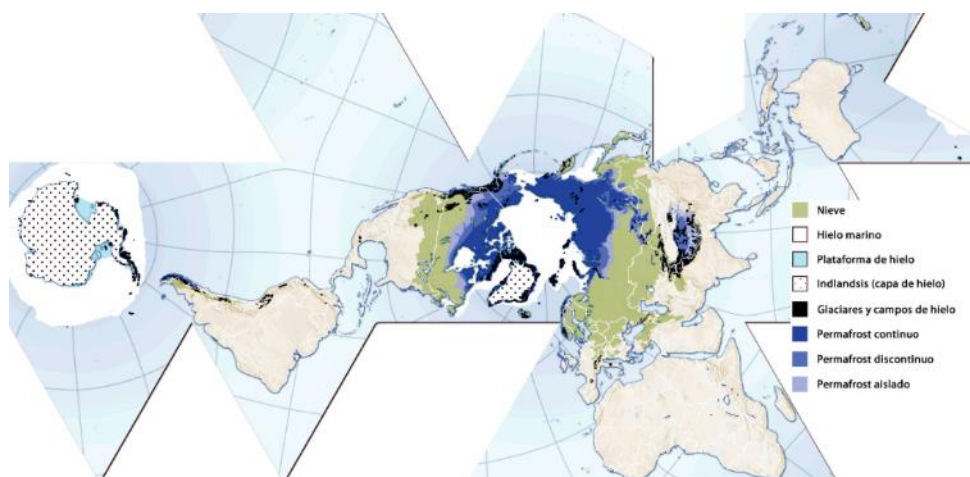


Figura 1. Distribución de los elementos de la criósfera. Tomado de <https://cambioclimaticoglobal.com/criosfer>

Los glaciares en particular, pese a su extensión menor en relación a otros elementos de la criósfera, poseen una importancia fundamental en zonas continentales tropicales. Sudamérica posee aproximadamente 25,000 km² de áreas glaciares (Dyurgerov & Meier, 2005), de éstas aproximadamente 2,758 km² corresponden a glaciares tropicales según datos de 1991. Se estima que más del 99% de los glaciares tropicales se ubican en los Andes de Sudamérica y más del 70% en las cordilleras del Perú (Kaser & Osmaston, 2002).

Radić y Hock (2010) realizaron una estimación del agua almacenada en los glaciares de montaña y capas de hielo en 19 regiones glaciares de la Tierra en base a la versión extendida del Inventario Mundial de Glaciares (WGI-XF) que contiene registros de alrededor de 131,000 glaciares que representan aproximadamente la mitad de las capas de hielo y los glaciares de montaña. De este grupo, se estima que Sudamérica posee 36,700 km², 19% de los cuales corresponde a glaciares tropicales (7,060 km²), superficie que, a su vez, significa apenas el 1% de la superficie y el 0.1% del volumen global de capas de hielo y glaciares.

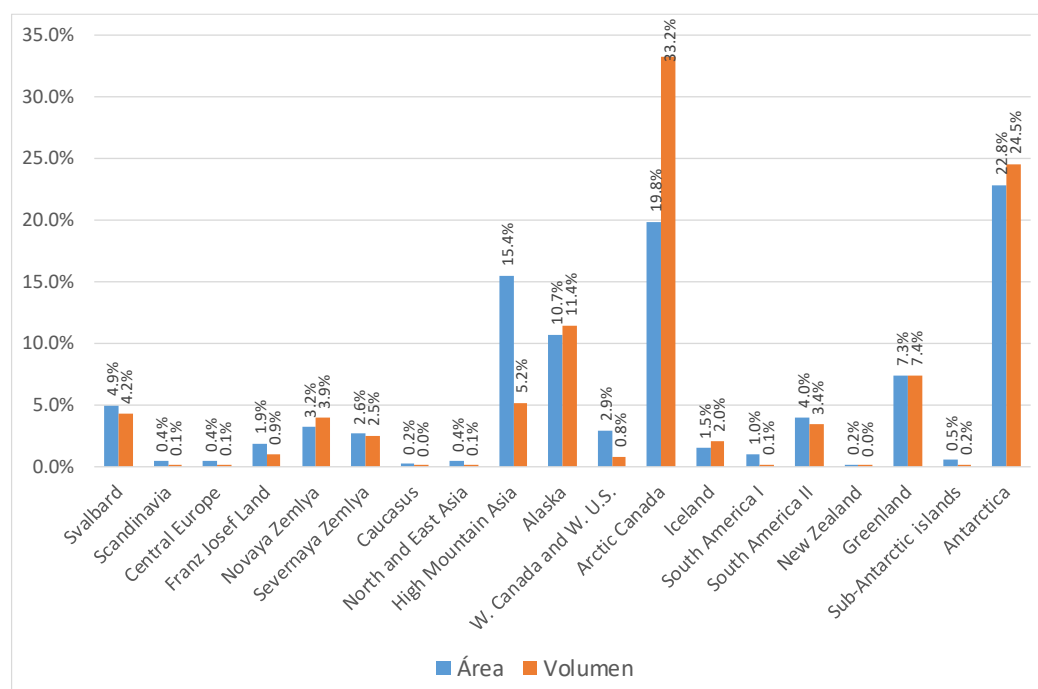


Figura 2. Porcentaje de área y volumen glaciar en capas de hielo y glaciares de montaña. Tomado de Radić y Hock (2010)

2.3.1.2. Cambio global en la criósfera

De modo similar en el que los elementos de la criósfera desempeñan un rol fundamental en la dinámica climática, son altamente sensibles a los cambios que ocurran sobre

aquella. Los glaciares temperados en particular son considerados los mejores indicadores climáticos pues son sensibles a condiciones atmosféricas como la radiación solar, temperatura, nubosidad, precipitación, etc. La temperatura atmosférica es la variable que juega un rol preponderante sobre el balance energético en el glaciar al influir en una serie de procesos complejos que en un periodo de muchos años conduce a variaciones en el balance de masa glaciar (WGMS, 2008).

El IPCC (2014) afirma de manera categórica que desde 1950 se viene produciendo un incremento en la temperatura atmosférica y cambios en el sistema climático sin precedentes en los últimos milenios con una clara influencia antrópica. Entre los años 1880 al 2012, la temperatura superficial oceánica y terrestre combinadas sufrieron un incremento de entre 0.65 a 1.06°C (0.85°C en promedio).

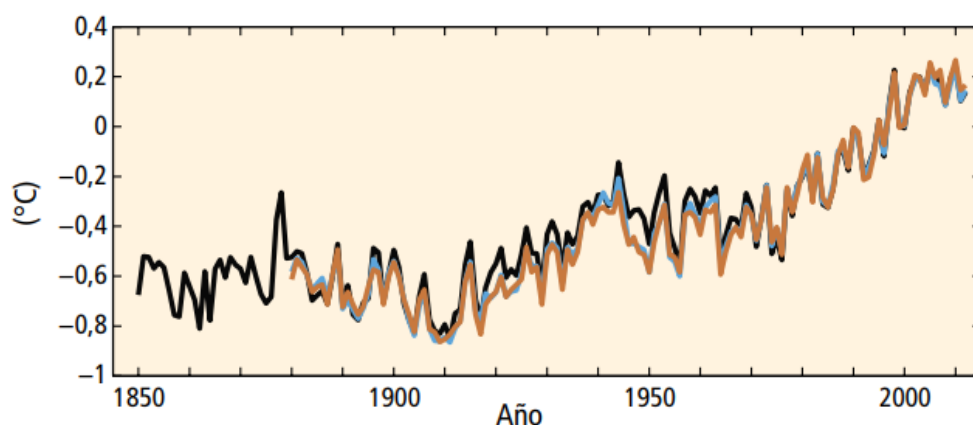


Figura 3. Anomalías del promedio de temperatura terrestre y oceánica. Tomado de Cambio Climático 2014 Informe de Síntesis. IPCC (2014).

En un período de referencia más reciente entre los años 2006 y 2015, se estima que el planeta experimentó un calentamiento promedio de 0.87°C en relación al período preindustrial de referencia correspondiente a los años 1850-1900.

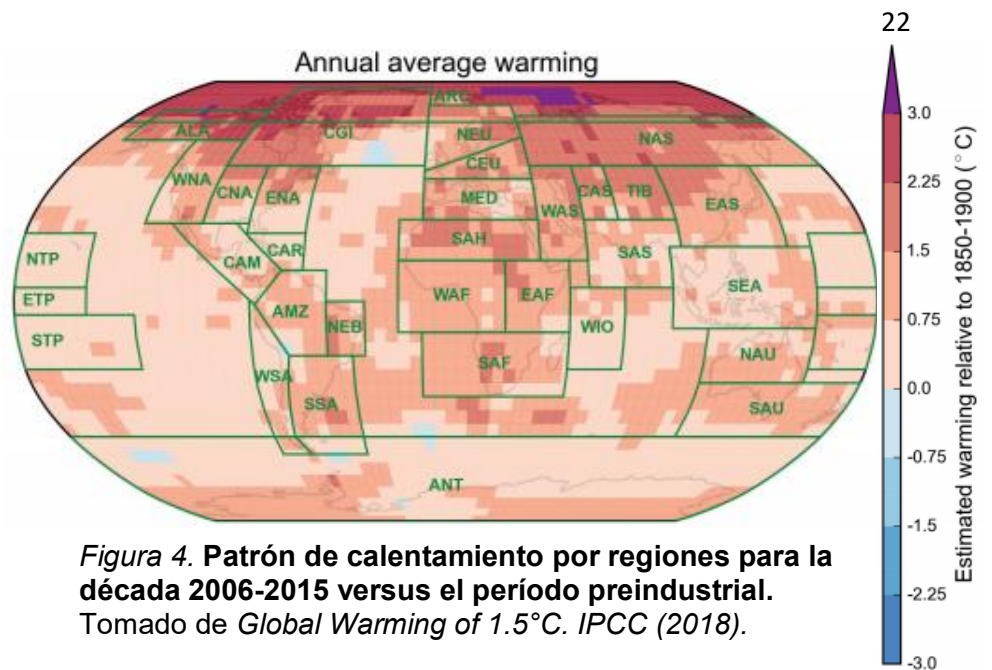


Figura 4. Patrón de calentamiento por regiones para la década 2006-2015 versus el período preindustrial.
Tomado de *Global Warming of 1.5°C. IPCC (2018)*.

Las evidencias de calentamiento de la atmósfera durante los años pasados sirven de base para los modelos climáticos futuros del IPCC, los que muestran una tendencia robusta al incremento para diferentes escenarios climáticos. Para el período 2081-2100 se proyecta un incremento superior a 1.5°C o 2°C, dependiendo del escenario climático, con un alto nivel de confianza (IPCC, 2014).

Cuadro 1. Cambios en la temperatura global en superficie.

Escenario	2046-2065		2081-2100	
	Media	Rango probable	Media	Rango probable
RCP2,6	1.0	0.4 a 1.6	1.0	0.3 a 1.7
RCP4,5	1.4	0.9 a 2.0	1.8	1.1 a 2.6
RCP6,0	1.3	0.8 a 1.8	2.2	1.4 a 3.1
RCP8,5	2.0	1.4 a 2.6	3.7	2.6 a 4.8

Fuente: Cambio Climático 2014 Informe de Síntesis. IPCC (2014).

Las regiones que experimentarían mayores niveles de calentamiento a nivel global se ubican en el hemisferio norte, sin embargo, en las regiones tropicales se espera un incremento importante que para los modelos más conservadores superaría 1°C y para los más severos los 2°C.

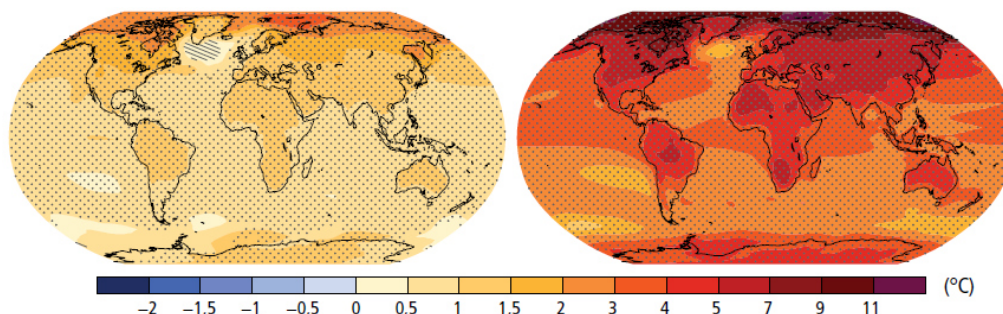


Figura 5. Cambios en la temperatura media global en superficie para los modelos climáticos RCP2,6 y RCP8,5. Cambio Climático 2014 Informe de Síntesis. IPCC (2014).

El IPCC (2014) también hace hincapié en la situación futura de los glaciares a nivel global, mostrando para todos los escenarios climáticos una importante disminución en su volumen.

Tomando como referencia el año 1960, en base a balances de masa glaciar (medida por métodos glaciológicos y geodésicos) realizados sobre cientos de glaciares a nivel mundial desde 1930, se registra una fuerte pérdida de masa glaciar la que se ha acelerado en los últimos años llegando a superar los 20 metros de agua equivalente (m w.e.) perdida en promedio (WGMS, 2017).

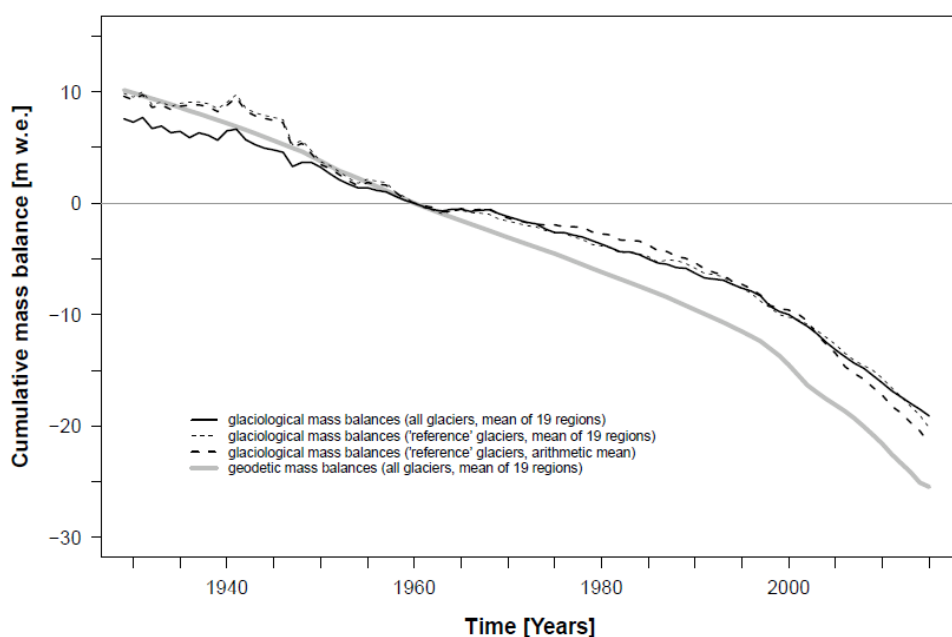


Figura 6. Balance de masa acumulativo en m w.e. desde 1930. Tomado de Global Glacier Change Bulletin. WGMS (2017).

En directa relación a la pérdida de masa glaciar, se observa un acelerado retroceso de los frentes glaciares en todo el mundo con impactos sobre los recursos hídricos y el incremento de riesgos.

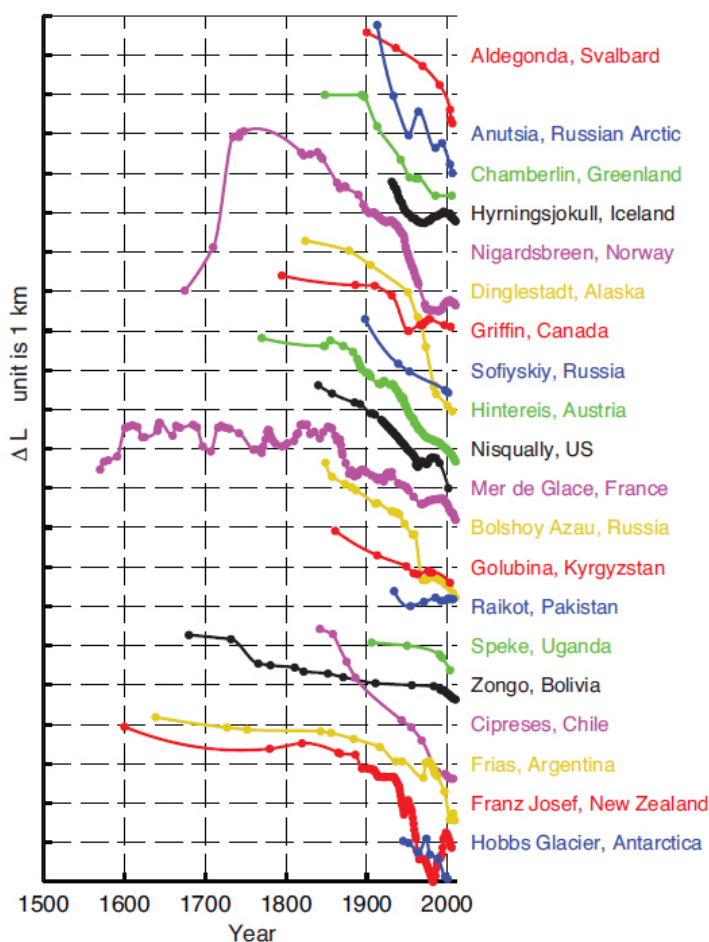


Figura 7. Variación en la longitud glaciar a nivel mundial. Tomado de A data set of worldwide glacier length fluctuations (2017).

2.3.1.3. Cambios en los glaciares peruanos

Los glaciares en el Perú son de tipo tropical, denominados glaciares templados, altamente sensibles a la temperatura atmosférica y sus variaciones. Su extensión ha venido siendo monitoreada desde 1962 por diversas instituciones, en 1989 se publica el primer inventario de glaciares por parte de ELECTROPERU. identificándose un

área glaciaria de 2,399.06 km² y 20 cordilleras glaciares. El año 2001 CONAM calcula una superficie de 1,595.59 km².

El 2014 la Autoridad Nacional del Agua determina que una superficie total de glaciares de 1,289.59 km² y, finalmente, el año 2018 INAIGEM calcula una superficie de 1,114.11 km², es decir, desde 1962 (año de captura de las imágenes con las que se realizó el primer inventario publicado en 1989) hasta el año 2016 (año de captura de las imágenes empleadas en el último inventario) se ha perdido un total de 1,284.95 km² de área glaciaria, el 54% del área inicial, habiendo también desaparecido dos cordilleras (INAIGEM, 2018).

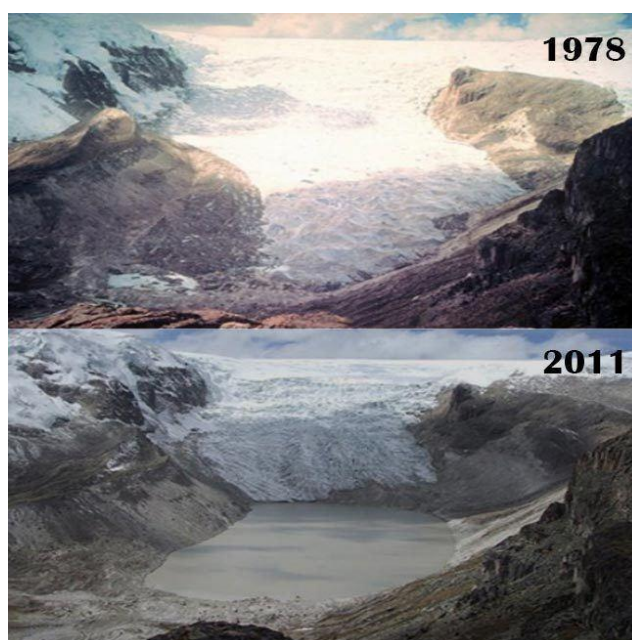


Figura 8. Retroceso del glaciar Qori Kalis, cordillera Vilcanota, Cusco. Tomado de <https://alchetron.com/Qori-Kalis-Glacier>

La acelerada reducción de la superficie glaciaria no afecta sólo a los glaciares peruanos, se trata de un fenómeno global asociado al calentamiento global y al cambio climático. Según los Escenarios Climáticos del Perú para el 2030 (SENAMHI-GEF-PNUD, 2009) elaborados a partir de modelos de circulación general en relación al escenario de

emisión A2 (alto nivel de incremento de CO₂), se estima que la temperatura máxima sufrirá variaciones positivas de hasta 1.6°C respecto a los valores actuales. En la sierra peruana estos picos en la temperatura máxima se presentarán en los meses de otoño e invierno. Lo mismo sucede con la temperatura mínima del aire que aumentará entre 1.4°C y 1.4 °C para el año 2030.

El incremento proyectado en las temperaturas continuará, en definitiva, afectando la dinámica de los glaciares acelerando el proceso de fusión glacial, desestabilizando las masas glaciares y dando origen a la formación de nuevas lagunas. Entre los años 1980 y 2003 se reportó la formación de 996 nuevas lagunas de origen glacial (Autoridad Nacional del Agua, 2014), como consecuencia, el nivel de peligro sobre las poblaciones, infraestructura y medios de vida en los valles glaciares se ha incrementado.



Figura 9. Laguna en formación en el frente del glaciar Pastoruri, cordillera Blanca, Ancash. Fotografía tomada por el autor (2012)

Cuadro 2. Inventario de glaciares al año 2016.

CORDILLERA		HIDRANDINA S.A., 1989				CONAM, 2001		MINAGRI - ANA, 2014		INAIGEM, 2018		HIDRANDINA S.A., REANALIZADO POR INAIGEM, 2016 & INAIGEM, 20183	
		CORPORACIÓN PERUANA DEL SANTA & ELECTROPERU		REANALIZADO POR INAIGEM, 2016		INSTITUTO NACIONAL DE GLACIARES Y GEOAMBIENTE		UNIDAD DE GLACIOLOGÍA Y RECURSOS HÍDRICOS		DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES			
		(1)		(2)		(3)		(4)		(5)		(2) - (5)	
Nº	NOMBRE	Año de la fotografía aérea	Área glaciar (km²)	Año de imagen satelital	Área glaciar (km²)	Año de imagen satelital	Área glaciar (km²)	Año de imagen satelital	Área glaciar (km²)	Año de imagen satelital	Área glaciar (km²)	Pérdida de superficie (km²)	Reducción del área glaciar (%)
1	Blanca	1962	723.37	1962/1975	726.26	1997	611.48	2003	527.62	2016	448.81	277.45	38.20
2	Huallanca	1962	20.91	1962/1975	21.05	1997	17.64	2007	7.01	2016	5.24	15.81	75.11
3	Huayhuash	1962	84.97	1962/1975	86.89	1997	71.68	2007	55.27	2016	53.06	33.83	38.93
4	Raura	1962	55.20	1962/1975	55.31	1997	28.92	2007	28.34	2016	25.62	29.69	53.68
5	Huagoruncho	1962	23.40	1962/1976	23.70	1997	13.38	2009	9.71	2016	7.58	16.12	68.02
6	La Viuda	1962	28.60	1962	28.60	1997	14.99	2007	6.03	2016	3.84	24.76	86.57
7	Central	1962	116.65	1962/1975-1978	117.20	1997	79.32	2007	51.91	2016	42.44	74.76	63.79
8	Huaytapallana	1962	59.08	1962/1984	68.05	1997	37.57	2009	26.40	2016	21.42	46.63	68.52
9	Chonta	1962	17.85	1962	17.85	1997	9.35	2009	1.40	2016	0.39	17.46	97.82
10	Ampato	1955	146.73	1955	146.73	1997	99.78	2010	60.96	2016	50.05	96.68	65.89
11	Vilcabamba	1962	37.74	1962/1975	261.45	1997	25.66	2009	129.15	2016	101.00	160.45	61.37
12	Urubamba	1962	41.48	1962/1975	76.16	1997	28.21	2009	26.39	2016	23.54	52.62	69.09
13	Huanzo	1955	36.93	1955/1975	39.31	1997	25.11	2010	4.51	2016	2.91	36.40	92.60
14	Chila	1955	33.89	1955	33.89	1997	23.05	2010	0.93	2016	0.19	33.70	99.44
15	La Raya	1962	11.27	1962	11.27	1997	7.66	2010	3.06	2016	1.90	9.37	83.14
16	Vilcanota	1962	418.43	1962/1975	495.05	1997	375.75	2009	279.40	2016	255.44	239.61	48.40
17	Carabaya	1962	104.23	1962/1975	107.17	1997	70.88	2009	34.53	2016	31.05	76.12	71.03
18	Apolobamba	1962	81.12	1962/1975	83.12	1997	55.16	2010	45.25	2016	39.63	43.49	52.32
19	Volcánica*	-						2009	0.72	Extinta			
20	Barroso*	-											
TOTAL			2,041.85		2,399.06		1,595.59		1,298.59		1,114.11	1,284.95	53.56

(1) Información trabajada por la Corporación Peruana del Santa y Electroperú, publicada por Hidrandina S.A. en 1989, no se logró cubrir en su totalidad las 20 cordilleras nevadas del Perú.

(2) Información reanalizada por INAIGEM con imágenes satelitales Landsat 2 MSS del año 1975, superficies no cubiertas en el primer inventario.

(3) Información trabajada por INAGGA desde 1997 con imágenes Landsat y publicada por CONAM en el 2001.

(4) Información trabajada por Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la ANA, desde 2003 y publicada en el 2014, en éste inventario se cubrió Cordillera Volcánica con imágenes Aster del 2009 en su totalidad, y en las demás cordilleras se utilizó Spot, Aster, Landsat y LISS III.

(5) Información trabajada por la Dirección de Investigación en Glaciares del INAIGEM, con imágenes Sentinel -2 del 2016, las Cordilleras Volcánica y Barroso, consideradas extintas en el análisis multispectral.

* Cordilleras Extintas

Fuente. Tomado del Inventario Nacional de Glaciares. INAIGEM (2018)

2.3.1.4. La Cordillera Blanca

Ancash es el departamento que muestra mayor cantidad de aluviones a nivel nacional originados todos ellos en la Cordillera Blanca (INGEMMET, 2009). La Cordillera Blanca, considerada la más alta y extensa de los trópicos, consiste en una cadena de glaciares a lo largo de 195 km² con una superficie glaciar de 448.81 km² para el año 2016. Se ubica en el norte del Perú con un ámbito de influencia de 13,602 km², posee una gran importancia hidrológica al ser la mayor reserva de agua dulce sólida del Perú y poseer cientos de lagunas de origen glaciar. Las precipitaciones en la Cordillera Blanca superan los 900 mm como promedio anual. Sus aguas son vertidas a las cuencas del río Santa, Marañón y Pativilca. La temperatura media anual varía entre 14°C y 16°C alrededor de los 3,000 m s.n.m y alrededor de 4°C por encima de los 4,500 m s.n.m.

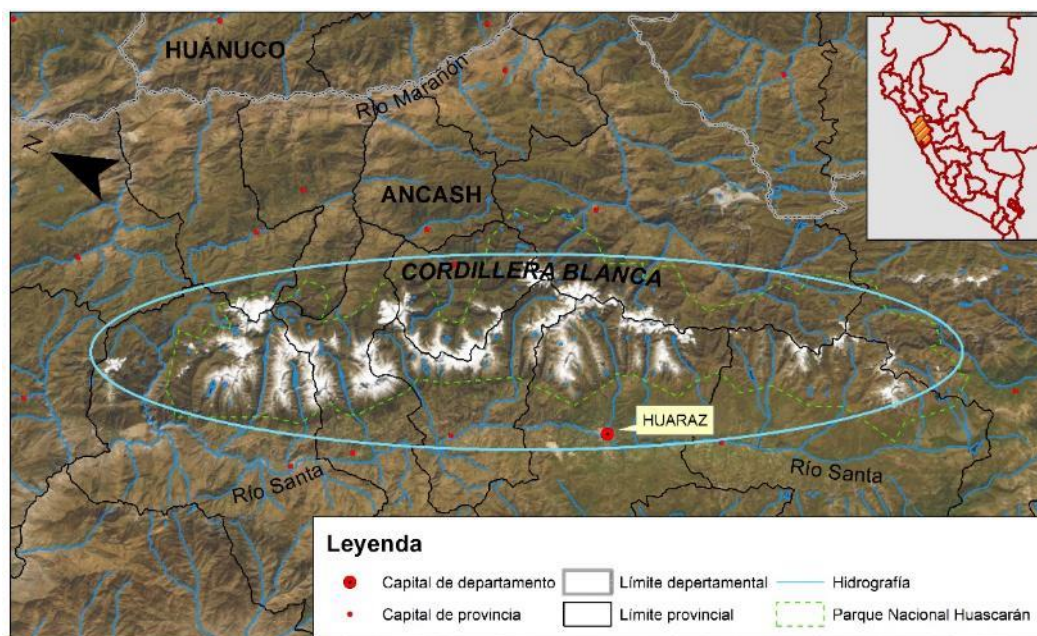


Figura 10. Ubicación de la Cordillera Blanca. Elaborado por el autor.

El Batolito de la Cordillera Blanca es el basamento rocoso de esta cordillera consistente en rocas intrusivas,

sedimentarias jurásicas y cretácicas. En su sector occidental afloran rocas sedimentarias y rocas volcánicas sedimentarias. Sobre estas formaciones existen depósitos cuaternarios de origen glaciar erosionados por la escorrentía superficial. En la vertiente oriental se observan rocas metamórficas precámbricas, sobre estas, rocas sedimentarias diversas, así como intrusiones de rocas plutónicas. La Cordillera Blanca posee los picos más elevados del territorio nacional llegando hasta los 6,768 m s.n.m. en la cumbre sur del nevado Huascarán. Todo el ámbito de la Cordillera Blanca presenta valles o quebradas en forma de U resultado de la dinámica glaciar.

Seis ecosistemas son los predominantes en la Cordillera Blanca: bofedales, bosques relictos andinos, bosques xéricos interandinos, cardonales, matorrales arbustivos y pajonales andinos, siendo estos dos últimos los ecosistemas predominantes.

El ámbito de influencia de la Cordillera Blanca comprende el territorio de 15 provincias del departamento de Ancash con una población estimada de 352,321 habitantes. Los recursos y servicios ecosistémicos que brinda la Cordillera Blanca son estratégicos para el desarrollo de diversas actividades económicas como la producción de energía eléctrica, minería, agricultura, ganadería, turismo, así como para el sustento de los medios de vida no sólo en su ámbito de influencia directo sino también en áreas lejanas como la zona costera de Ancash y el departamento de La Libertad (INAIGEM, 2018).



Figura 11. Nevado Huascarán 6768 m s.n.m. Fotografía tomada por el autor (2016)

2.3.1.5. Peligros de origen glaciar

Los peligros de origen glaciar se clasifican en (Huggel, 2004):

Flujos glaciares: También conocidos como aluviones o GLOF (Glacier Lake Outburts Floods) constituyen los peligros más grandes y extendidos en las zonas glaciares del mundo. Los flujos glaciares son producidos por el desembalse de reservorios sobre el glaciar o debajo su frente.

Avalanchas de hielo: El daño causado por estos fenómenos está restringido a regiones altamente pobladas en zonas de alta montaña sobre todo en los Alpes.

Avance y retroceso glaciar: Este tipo de peligro afecta directamente a infraestructura e instalaciones en alta montaña. Actualmente, los glaciares están en retroceso, los peligros asociados son la desestabilización de pendientes rocosas, erosión de reservorios de escombros, la formación de lagunas con diques inestables de hielo-

morrena, así como cambios en la geometría glaciar con el posible incremento del peligro de avalanchas.

Flujos de escombros periglaciares: El retroceso glaciar está asociado a la formación de grandes depósitos de sedimentos inconsolidados los que, una vez expuestos, representan una fuente potencial de flujos de escombros.

Caída de rocas: Este fenómeno está asociado al retroceso glaciar y a cambios en el permafrost en combinación con avalanchas de hielo y el incremento de la escorrentía en las superficies glaciares.

Volcanes cubiertos de glaciares: Los lahares (flujos de escombros de origen volcánico) pueden impactar áreas a una distancia de más de 100 km y constituyen un nuevo gran peligro relacionado a los glaciares.

Diferentes tipos de peligros pueden combinarse e interactuar, muchos de las más grandes catástrofes de origen glaciar se han producido como consecuencia de una combinación o cadena de procesos.

El cambio climático, como fenómeno global e inexorable, también afecta a la Cordillera Blanca, en 54 años entre los años 1962 y 2016 el área glaciar se redujo de 726.26 km² a 448.81 km², es decir se perdió el 38.2% de la superficie glaciar existente en 1962 (INAIGEM, 2018). Las consecuencias de este acelerado fenómeno son diversas siendo la más relevante en Ancash, el incremento de los peligros de origen glaciar asociados a movimientos en masa.

Según los registros del INGEMMET (2009) actualizados por el INAIGEM (2018), se han registrado 32 eventos catastróficos originados en la Cordillera Blanca. El primer registro data de 1702 con la inundación de la ciudad de Huaraz, el último, del año 2012, consistió en la falla del dique de la laguna Artizón Bajo en la provincia de Huaylas.

De los fenómenos registrados destaca el aluvión ocurrido en la ciudad de Yungay como consecuencia del desprendimiento de roca y masa glaciar del pico norte del nevado Huascarán como consecuencia del terremoto de 1970. Otro fenómeno resaltante y que reviste especial importancia para la presente investigación, fue el aluvión ocurrido el 13 de diciembre de 1941 originado en la laguna Palcacocha que destruyó un sector importante de la ciudad de Huaraz acabando con la vida de miles de personas (Wegner, 2014). Según la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua, existen 22 lagunas potencialmente peligrosas en la Cordillera Blanca ocho de ellas han sido confirmadas como de alta peligrosidad por el INAIGEM.



Figura 12. Aluvión de Yungay en 1970. Tomado de <https://www.actualidadambiental.pe/ancash-glaciares-del-peru-se-imponen-en-exposicion-fotografica-al-aire-libre/>



Figura 13. Aluvión de 1941 en la ciudad de Huaraz. Tomado de Lo que el Agua se Llevó. Wegner (2014).

Una de las lagunas consideradas de alta peligrosidad es Palcacocha y su importancia radica el enorme incremento de su volumen luego del evento de 1941. En 1974 el volumen de la laguna fue calculado en $514,800 \text{ m}^3$, el año 2009 su volumen se incrementó a $17'325,207 \text{ m}^3$ y el año 2016 su volumen se calculó en $17'403,353 \text{ m}^3$ con una profundidad de 71.1 metros (Cochachin & Salazar, 2016). Este severo incremento al que se suma la existencia de glaciares colgados, morrenas laterales empinadas de hasta 60 metros y la existencia de la falla activa de la Cordillera Blanca; configuran un escenario de peligro para la ciudad de Huaraz ubicada 23 km aguas abajo de la laguna.

La laguna Palcacocha ha sido declarada en emergencia 11 veces hasta el año 2016. El año 2017 se publica la ley N° 30612 que declara de preferente interés nacional y necesidad pública la protección, conservación y prevención de riesgos de la laguna Palcacocha (El Peruano, 2017).

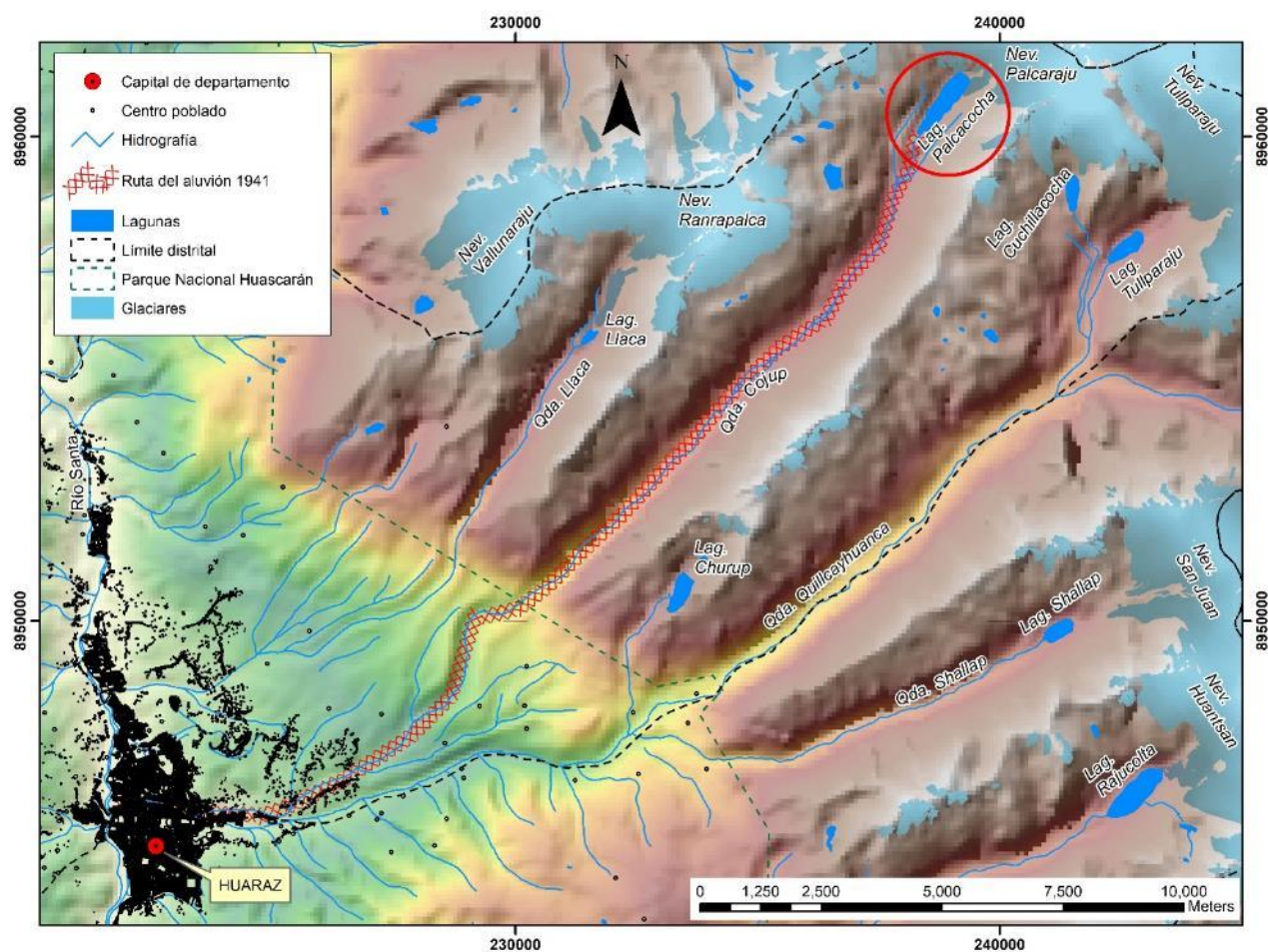


Figura 14. Ubicación de la laguna Palcacocha. Elaborado por el autor.

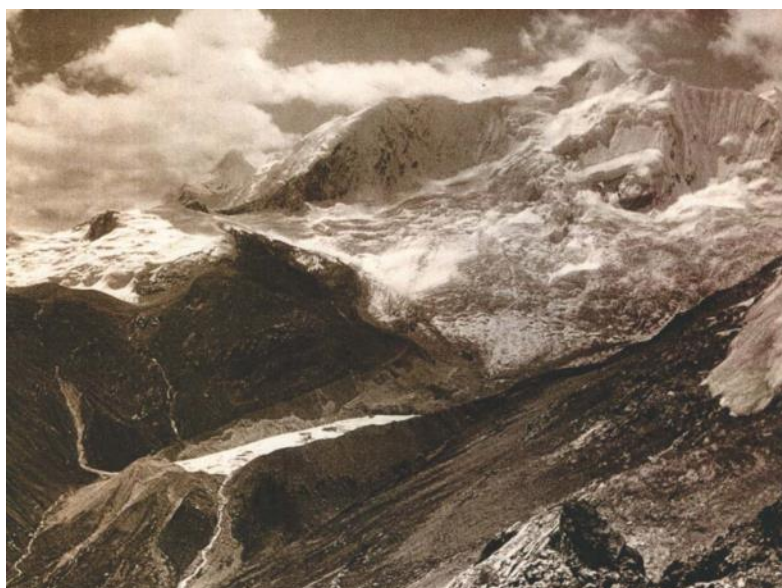


Figura 15. Situación de la laguna Palcacocha en 1940. Tomado de Lo que el Agua se Llevó. Wegner (2014).

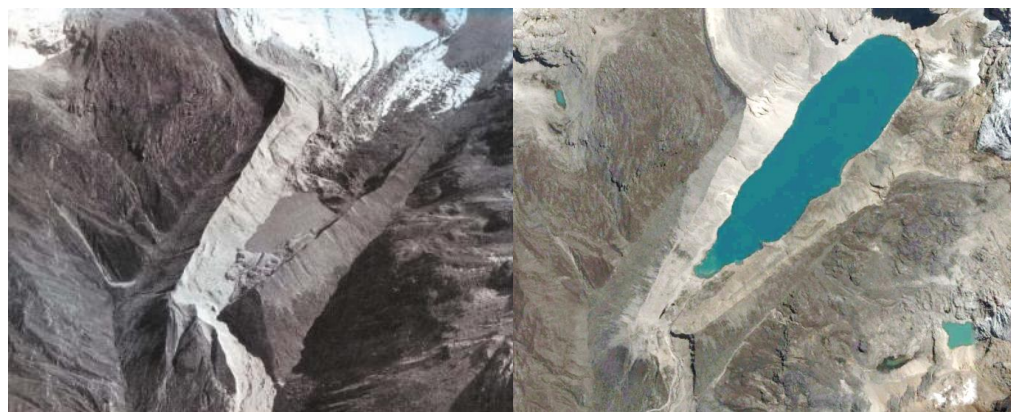


Figura 16. Laguna Palcacocha el año 1947 y 2017. Tomado de Lo que el Agua se Llevó. Wegner (2014) y Google Earth.

2.3.1.6. Peligro por aluvión en Huaraz

Diversos estudios se han realizado en la ciudad de Huaraz en relación al peligro existente frente a un aluvión de la laguna Palcacocha. El año 2003, a través del proyecto Ciudades Sostenibles (INDECI-PNUD PER/02/051) se formula el plan de prevención ante desastres en Huaraz documento que incluye un mapa de peligros que considera, entre otros, el peligro de aluvión en el cauce y antigua zona aluviónica de río Quillcay con la categoría de muy alto (INDECI, 2003).

El año 2004 como parte del Plan de Desarrollo Urbano Huaraz–Independencia 2004-2009, se elaboran los planos de eventos aluviónicos y de vulnerabilidad en caso de aluviones para la ciudad de Huaraz a cargo del equipo técnico de la Municipalidad Provincial de Huaraz determinándose cuatro zonas de vulnerabilidad, término que en la metodología actual (CENEPRED) debería denominarse peligro, pues hace referencia a las zonas potencialmente afectadas por el aluvión y no las características intrínsecas de la zona urbana que definirían su vulnerabilidad frente a este fenómeno.

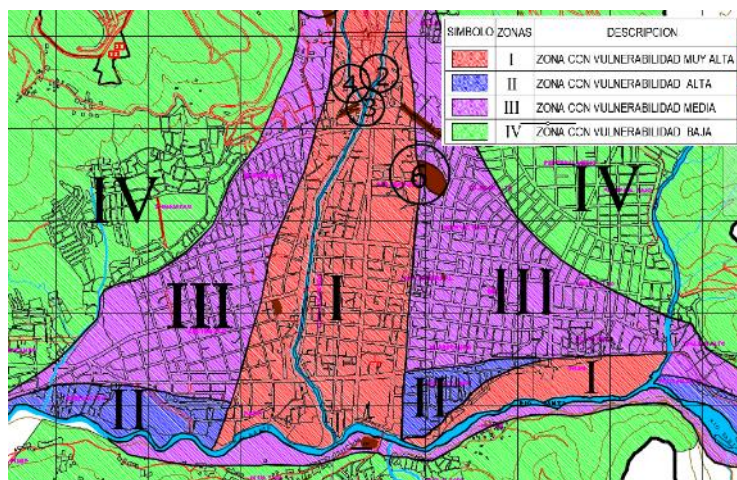


Figura 17. Vulnerabilidad frente a aluviones en Huaraz. Municipalidad Provincial de Huaraz (2004).

El año 2014 en el marco de los proyectos HIMAP e IMACC Quillcay desarrollados por el MINAM, BID, la Universidad de Texas y el Instituto de Montaña; se desarrolló un modelo de aluvión originado en la laguna Palcacocha como consecuencia de una potencial avalancha. Los resultados muestran que un amplio sector de la ciudad de Huaraz sería afectado por el aluvión en ambas márgenes del río Quillcay, con tiempos de llegada de alrededor de una hora, velocidades superiores a 1m/s y más de un metro de material acumulado (Somos, Chisolm, McKinney, & Rivas, 2014).

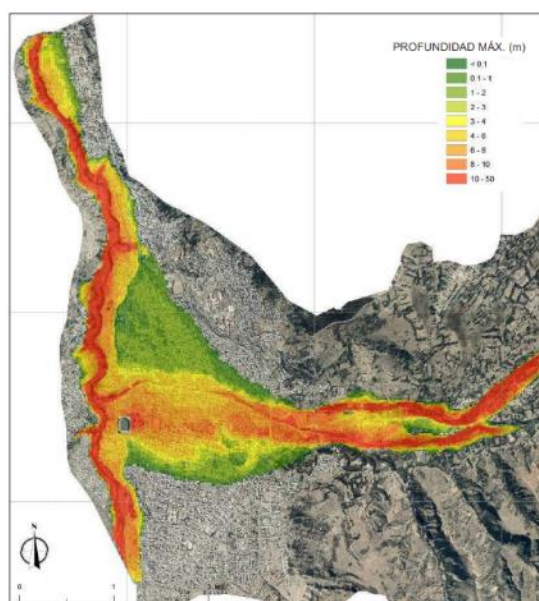


Figura 18. Modelo de acumulación de flujo – Aluvión de Palcacocha. Tomado de Modelo de Inundación por Potencial Aluvión desde la Laguna Palcacocha Huaraz, Perú (2014).

El año 2016, como parte del proyecto Glaciares+ a cargo de la ONG CARE PERÚ, se decide desarrollar un trabajo sinérgico entre las universidades de Texas y Zurich a fin de lograr un modelo de peligro por aluvión de mayor consenso a nivel científico, social y político; que además aborde la preocupación sobre otras dos lagunas ubicadas en la cabecera de la cuenca del río Quillcay al Este de la ciudad de Huaraz con potencial de producir aluviones, se trata de las lagunas de Tullparaju y Cuchillacocha ambas ubicadas en la quebrada Quillcayhuanca.

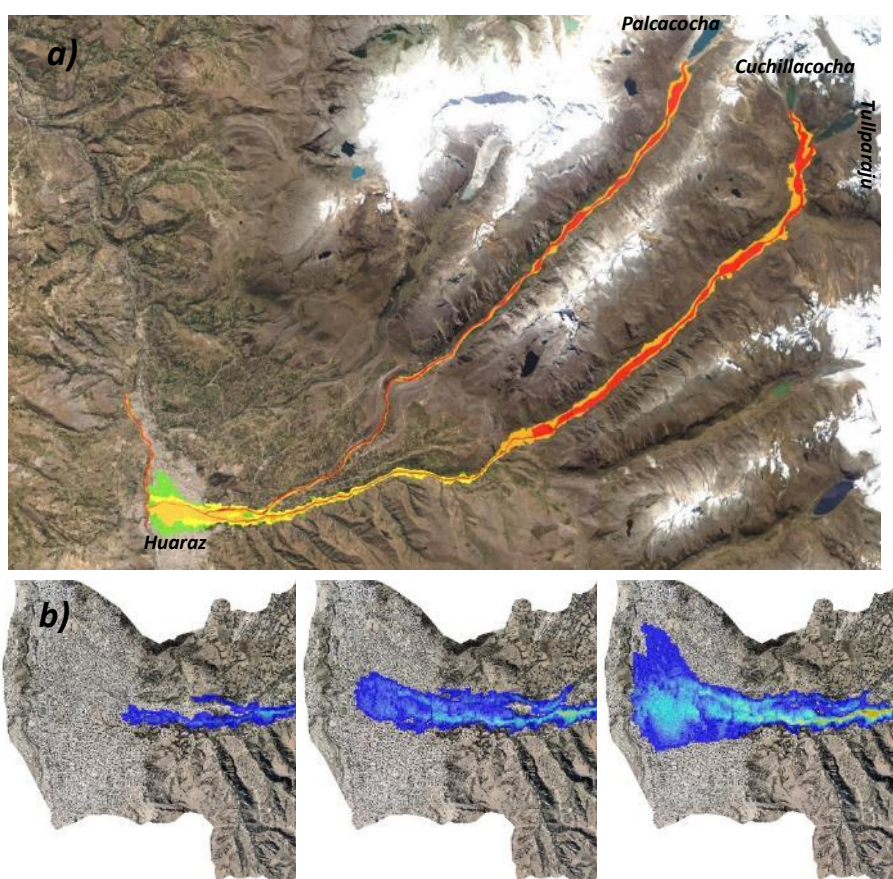


Figura 19. a) Recorrido modelado de los flujos aluviónicos. b) Resultado sobre la acumulación de flujo aluviónico en base a los escenarios (300,000 m³; 750,000 m³; 1.8 millones m³). Tomado de Modelización de cadenas de procesos relacionados a desbordes de lagunas glaciares en la sub-cuenca Quillcay, Cordillera Blanca. Frey (2016).

De manera similar al trabajo desarrollado el año 2014, se modeló la cadena de procesos que daría lugar a un aluvión potencial, es decir, el desprendimiento de un volumen de masa glaciaria (avalancha) que produciría una ola de impacto en las lagunas en estudio (Palcacocha, Cuchillacocha y Tullparaju) y en consecuencia la falla de los diques morrénicos y aluvión. En cada caso se empleó información de relieve de alta resolución espacial, información hidrométrica de las lagunas y ríos. Se utilizaron programas especializados como RAMMS, FLOW-3D, Heller, BASEMENT, FLOW2D. Tres escenarios de avalancha se aplicaron para cada una de las tres lagunas (Frey, 2016).

Tomado como base el escenario de mayor nivel de impacto sobre la ciudad de Huaraz (Volumen de 1.8 millones de m^3 , caudal máximo de $2,000 m^3/s$, duración de 2,000 seg.) se elaboró el mapa de peligro frente a aluviones en coordinación con entidades como la municipalidad provincial de Huaraz, distrital de Independencia, el Gobierno Regional de Ancash e INDECI Ancash.

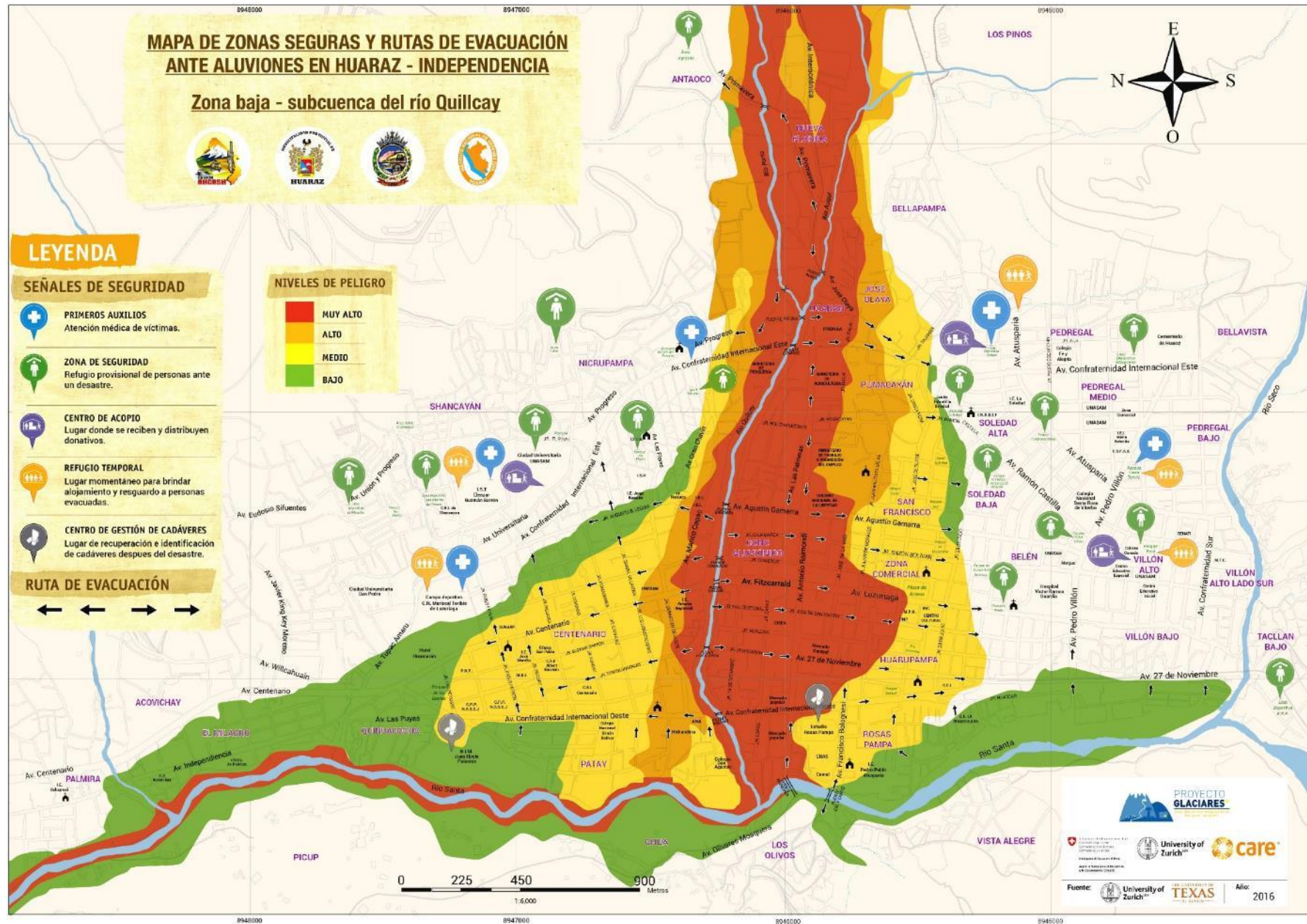


Figura 20. Mapa de peligro frente a aluviones en Huaraz. Municipalidad provincial de Huaraz.

2.3.2. La ciudad de Huaraz

2.3.2.1. Reseña histórica

Existe controversia sobre la creación de la actual ciudad de Huaraz, sin embargo, existe consenso sobre su inexistencia prehispánica. Según Gonzáles (1992) Huaraz fue fundada en noviembre de 1572 con el nombre de Huaraz – Pampa de San Sebastián como un emplazamiento temporal de población indígena. Alba (2017) señala que Huaraz fue fundada el 20 de enero de 1574 día de la festividad de San Sebastián. Durante el virreinato Huaraz fue la cede del corregimiento del mismo nombre.

El año 1725 ocurrió un terremoto que afectó sobre todo la infraestructura eclesiástica del pueblo, Gonzáles (1992), señala que a partir de este año Huaraz se desarrolla como una ciudad conformada por algunos españoles y una mayoritaria población criolla, mestiza e indígena.



Figura 21. Plano del pueblo de Huaraz en 1786. Tomado de Huarás, Historia de un Pueblo en Transformación (Alba, 2017).

El 18 de enero del año 1823, el Congreso Constituyente otorga a Huaraz la categoría de ciudad, capital del departamento de Ancash, con el apelativo de “Muy generosa ciudad de Huaraz”. En los siguientes años se crea la provincia de Huaraz y en la ciudad prosperan movimientos culturales hasta los eventos ocurridos durante la guerra con Chile y los levantamientos campesinos destacando el liderado por Pedro Pablo Atusparia.

A principios de 1900 y hasta aproximadamente 1920 Huaraz se moderniza, estableciéndose algunas industrias, la minería, la luz eléctrica. Se crea el barrio de Centenario y se da inicio a la construcción de las carreteras hacia Casma y pativilca. El 13 de diciembre de 1941 se produce un aluvión que destruye el nuevo barrio de Centenario forzando a la ciudad a crecer desordenadamente hacia el sur (barrio de Pedregal). En 1970 se produce un terremoto que destruye casi completamente la ciudad encargándose su reconstrucción CRYRZA surgiendo, de esta manera, la moderna ciudad de Huaraz (Gonzáles, 1992).

2.3.2.2. Crecimiento urbano

La población total del Perú estimada en el censo del año 2017 fue de 31'237,385 habitantes (29'381,884 censados) evidenciando un importante crecimiento respecto al año 1940 en el que la población ascendía a 7'023,111 habitantes (6'207,967 censados), este mismo año, el 28.3% de la población vivía en la Costa, el 65% en la Sierra y el 6.7% en la Selva; el año 2017 la distribución poblacional cambió radicalmente, el 58% de la población vivía en la Costa, el 28.1% en la Sierra y el 13.9% en la Selva; resulta evidente en severo despoblamiento de la Sierra peruana cuya población migró masivamente hacia la

Costa (INEI, 2018). Este proceso también significó un crecimiento explosivo de los núcleos urbanos ocasionado por el abandono de las zonas rurales, el año 1940 el 35.4% de la población peruana habitaba áreas urbanas, el año 2017 este porcentaje ascendió a 82.4% (INEI, 2019), fenómeno que continua actualmente y que nos permite prever que las principales ciudades del país continuarán creciendo, en muchos casos de manera desordenada.

En Ancash, la población censada varió de 424,975 habitantes en 1940 a 1'083,519 habitantes el año 2017 (INEI, 2018) y de manera similar a lo que viene ocurriendo en el resto del país, los núcleos urbanos crecieron significativamente, el año 1940 la población urbana de Ancash comprendía el 23% (INEI, 2009), el año 2017 esta cifra subió a 71.6% (INEI, 2019).

A nivel de la provincia de Huaraz, el año 1981 la población urbana representaba el 53.6% (INEI, 2009), el año 2017 este porcentaje ascendió a 79.3% (INEI, 2019). La población de la ciudad de Huaraz, capital del departamento de Ancash, ha venido creciendo constantemente, el año 1941 se estima que su población fue de 34,998 habitantes (Wegner, 2014), en 1981 la población fue de 44,810 habitantes, en 1993 se censaron 66,890 habitantes, el 2007 la población fue de 100,930 y el 2015 de 127,040 habitantes.



Figura 22. Plaza de Armas de la ciudad de Huaraz el año 1910. Tomado de [https://www.academia.edu/40501501/Huaraz_2012-2022 Plan de Desarrallo Urbano](https://www.academia.edu/40501501/Huaraz_2012-2022_Plan_de Desarrallo Urbano)

Se estima que para el año 2019 la población sería de aproximadamente 140,541 habitantes (Population.city, 2019), evidentemente, este crecimiento es caótico y carente de una adecuada planificación en sintonía a la realidad de las principales ciudades del Perú en Costa, Sierra y Selva dando lugar a la ocupación irregular y precaria, y por lo tanto vulnerable, de áreas expuestas a peligros, no aparentes para el asentamiento de poblaciones.

Es moneda común todos los años, en diferentes lugares del Perú y del mundo, que se registren desastres en zonas urbanas y sobre todo urbano marginales asociadas a la ocupación de áreas expuestas a fenómenos naturales de movimientos de masas, con impactos lamentables sobre la vida e infraestructura, situación que se agravaría a futuro pues se espera que, en el año 2050, el 70% de la población mundial viva en ciudades (ISOTools, 2018).

Si bien los gobiernos locales tienen competencia legal en la gestión y planificación del desarrollo urbano que se implementan mediante instrumentos como el Plan de Acondicionamiento Territorial, Plan de Desarrollo Urbano,

Plan de Gestión de Riesgos, etc. su cumplimiento es limitado no existiendo un análisis de desempeño estandarizado con indicadores reconocidos nacional e internacionalmente. Frente a esta realidad la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) ha formulado el estándar ISO 37120 - Ciudades y Comunidades Sostenibles, actualizado hasta el año 2018, en el que se han establecido 111 indicadores que evalúan el desempeño de los servicios y la calidad de vida en las ciudades incluyendo los estándares ISO 37122 sobre ciudades inteligentes e ISO 37123 sobre ciudades resilientes, así como su forma de medición. El estándar plantea indicadores medio ambiente, cambio climático y peligros naturales que podrían ser de utilidad la gestión y planificación de las ciudades (International Organization for Standardization, 2020).

2.3.2.3. *Vulnerabilidad y riesgo frente a peligros de origen glaciar*

El crecimiento poblacional de la ciudad de Huaraz, aunado a una débil planificación urbana, da lugar al incremento de la vulnerabilidad por exposición frente a peligros de origen glaciar. Inicialmente Huaraz estaba conformada por algunas manzanas alrededor de Plaza Mayor creciendo posteriormente a territorios entre los ríos Quillcay, Seco, Santa y áreas planas aledañas con edificaciones de adobe. El terremoto de 1970 ocasionó la destrucción del 90% de la ciudad, con la reconstrucción, se configuró el desarrollo de una ciudad moderna, sin embargo, en años posteriores el proceso de urbanización no respondió a criterios de seguridad física, dando lugar a la creación de barrios en áreas afectadas por los eventos catastróficos de 1941 y 1970. Se suma a este escenario, la colmatación del cauce

del río Quillcay y una densa ocupación del área aluviónica (INDECI, 2003).

La vulnerabilidad por exposición también se ve incrementada por el deterioro y deficiencias en las edificaciones, así como por la contaminación ambiental en zonas de alta concentración urbana aledañas al río Quillcay. La vulnerabilidad por fragilidad está relacionada a las condiciones de las viviendas, servicios básicos y vías de comunicación. En la zona expuesta a peligros, aproximadamente 50% de las edificaciones en esta zona son de materiales altamente vulnerables a peligros de origen glaciar (MDI-MPH, 2018).

Cuatro niveles de vulnerabilidad han sido establecidos para la ciudad de Huaraz (CENEPRED, 2014):

Muy alto: Servicios educativos expuestos: mayor a 75% del servicio educativo expuesto. Configuración de elevación de la edificación: 5 pisos. Incumplimiento de procedimientos constructivos de acuerdo a normatividad vigente: mayor a 80%. Localización de la edificación: Muy cerca 0 a 0.20 km. Servicios de agua y desagüe: mayor a 75% del servicio expuesto. Servicio de empresas eléctricas expuestas: mayor a 75%. Servicio de empresas de distribución de combustible y gas: mayor a 75%.

Alto: Servicios educativos expuestos: menor o igual a 75% y mayor a 50% del servicio educativo expuesto. Servicios de salud terciarios expuestos: menor o igual a 60% y mayor a 35% del servicio de salud expuesto. Actitud frente al riesgo: escasamente provisoria de la mayoría de la población. Localización de la edificación: cercana 0.20 a 1 km. Servicios de agua y desagüe: menor o igual 75% y

mayor a 50% del servicio expuesto. Servicios de agua y desagüe: mayor a 75% del servicio expuesto.

Medio: Estado de conservación de la edificación: Regular. Topografía del terreno: $20\% \leq P \leq 30\%$. Localización de la edificación: medianamente cerca 1 a 3km. Servicios de agua y desagüe: menor o igual 50% y mayor a 25% del servicio expuesto. Servicios de agua y desagüe: mayor a 75% del servicio expuesto.

Bajo: Servicios educativos expuestos: menor o igual a 25% del servicio educativo expuesto. Servicios de salud terciarios expuestos: menor o igual a 20% del servicio de salud expuesto. Materia de construcción: ladrillo o bloque de cemento. Estado de conservación de la edificación: Bueno a muy bueno. Topografía del terreno: $P \leq 10\%$. Configuración de elevación de la edificación: menos de 2 pisos.



Figura 23. Zona de alta vulnerabilidad frente a aluviones en Huaraz. Fotografía tomada por el autor (2019).

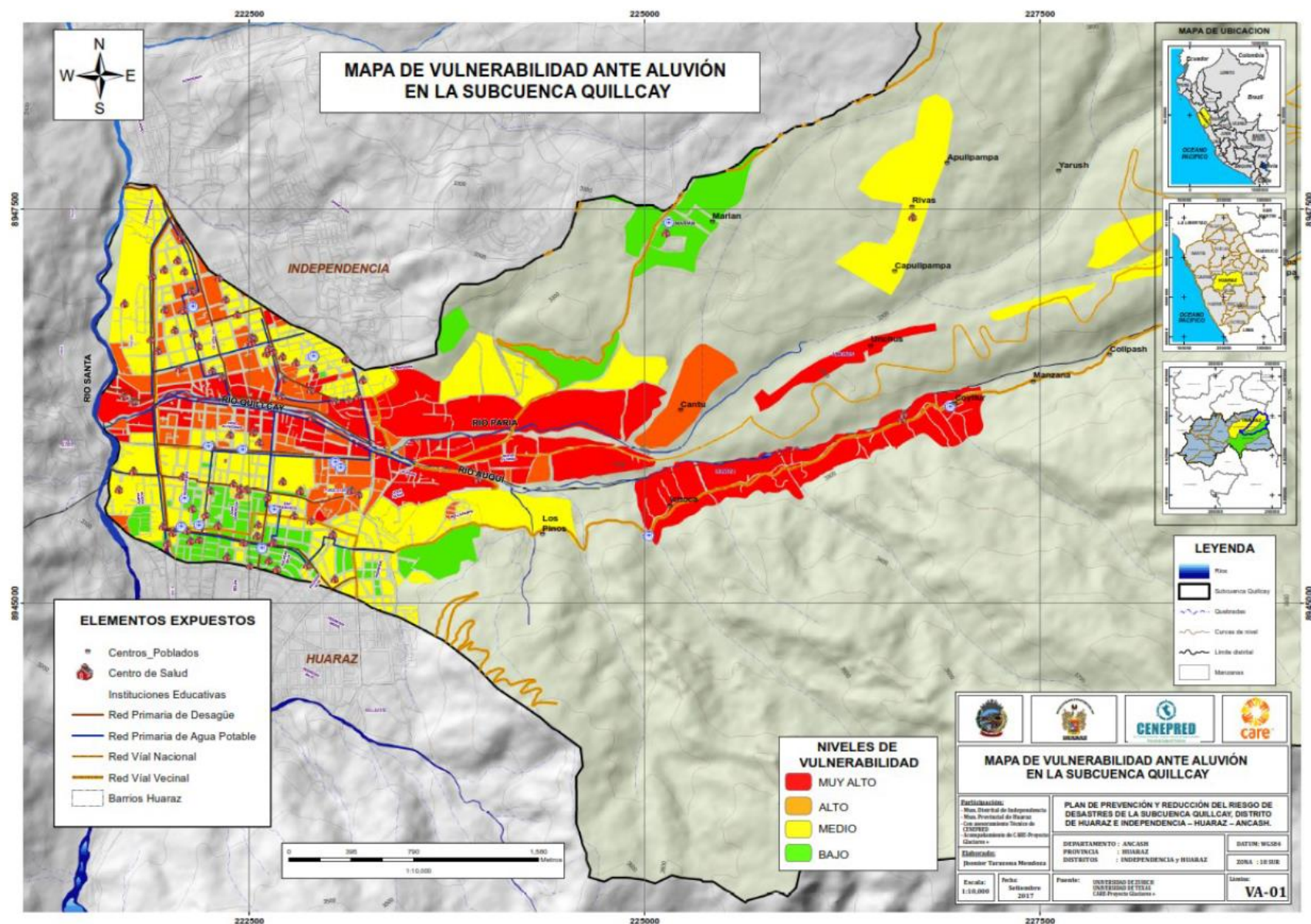


Figura 24. Mapa de vulnerabilidad ante aluviones en Huaraz, año 2017. Tomado de Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres de la Subcuenca Quillcay 2018-2021.

2.3.2.4. *Evaluación del riesgo*

El riesgo resultado de la integración del peligro con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, la siguiente expresión resume los conceptos de peligro, vulnerabilidad y riesgo (CENEPRED, 2014):

$$R_{ie} \mid_t = f(P_i, V_e) \mid_t$$

R= Riesgo.

Pi =Peligro con la intensidad mayor o igual a i durante un período de exposición t

Ve = Vulnerabilidad de un elemento expuesto

Un elemento importante relacionado al peligro es la susceptibilidad, definida como la predisposición a que un determinado fenómeno o evento ocurra en un territorio determinado dependiendo de factores condicionantes como la geología, geomorfología, fisiografía, suelos e hidrología; y desencadenantes como los fenómenos hidrometeorológicos, geológicos o antropogénicos. Otro aspecto importante del peligro son los elementos expuestos o territorio ubicado dentro del área de influencia de un fenómeno considerando los posibles daños.

La vulnerabilidad está determinada por tres factores: exposición, fragilidad y resiliencia. La exposición es la ubicación de poblaciones y sus medios de vida en territorios impactados por algún peligro. La fragilidad son las condiciones de internas de la sociedad que la harán más o menos débiles frente al impacto de un peligro. La resiliencia es la capacidad de recuperación frente a los impactos de un peligro. La exposición, en particular, posee tres dimensiones, una social, referida a población, salud y educación; otra económica, referida a actividades

productivas; y otra ambiental, referida a los recursos renovables y no renovables.

En base a la metodología establecida por CENEPRED (2014) y mediante el empleo de diversas matrices y Sistemas de Información Geográfica, la Municipalidad Distrital de Independencia y la Municipalidad Provincial de Huaraz han establecido el mapa de riesgo por aluvión por aluvión en el que las áreas aledañas al cauce del río Quillcay poseen los mayores niveles de exposición como insumo para el Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres al 2018-2021 de la Subcuenca Quillcay (ver Figura 25).

Marcelo Somos (2014) emplea una adaptación de la metodología LIFESim empleando información sobre el peligro frente a aluviones, la vulnerabilidad de la ciudad de Huaraz y la implementación potencial de un sistema de alerta temprana. LIFESim es un sistema dinámico espacialmente distribuido para la estimación de pérdida de vidas frente a la ocurrencia de flujos diversos. El resultado del modelo estima una pérdida de 19,773 vidas en el caso de que no exista un sistema de alerta temprana contra 7,344 en el caso que se implemente este sistema.

2.3.3. Geomática aplicada a la evaluación de riesgos de origen glaciar

La teledetección, los sistemas de información geográfica (SIG) y los programas computacionales de modelamiento son actualmente herramientas fundamentales para los trabajos de evaluación de riesgos de todo tipo, incluyendo las etapas de análisis de los peligros y la vulnerabilidad (Huggel, 2004). La teledetección o sensoramiento remoto posee dimensiones espectrales, espaciales, radiométricas y temporales que son útiles para el análisis de peligros de origen glaciar.

Inicialmente las fotografías aéreas fueron el sistema convencional para obtención de imágenes remotas empleando emulsiones sensibles a la radiación visible e infrarroja produciendo fotografías analógicas en blanco/negro y en color (Sobrino, y otros, 2000). Las fotografías aéreas son representaciones abstractas del terreno obtenidas mediante sensores aerotransportados y espaciales (Space Shuttle, CORONA, COSMOS) con una proyección central, debido a este hecho presentan deformaciones ocasionadas por el relieve del terreno, la inclinación de la cámara y distorsiones geométricas ocasionadas por la lente (Deagostini, 1990).

La fotogrametría es el conjunto de técnicas para obtener información geométrica de fotografías aéreas corrigiendo los desplazamientos mencionados, una propiedad fundamental de las fotografías aéreas para este fin es la estereoscopia o capacidad de observar un territorio desde dos puntos de vista. Entre las técnicas destacan la restitución fotogramétrica, es decir, la corrección del desplazamiento por relieve habiéndose empleado históricamente diversos equipos analógicos. Actualmente las fotografías aéreas son digitales, así como su procesamiento a través de programas fotogramétricos especializados.

Las imágenes satelitales poseen características multiespectrales (captura de información en diferentes regiones del espectro electromagnético del visible al infrarrojo térmico) permiten el mapeo de los glaciares, separar hielo limpio y nieve, así como la detección de glaciares cubiertos. Los diferentes tipos de materiales de la superficie terrestre presentan un comportamiento o respuesta particular frente a las diversas longitudes de onda del espectro electromagnético, esta característica es aprovechada por los sensores satelitales pasivos multiespectrales para separar en diferentes imágenes la respuesta de la superficie terrestre, denominada radiancia, correspondiente un determinado rango espectral o banda (Chuvieco, 2010).

Las bandas espectrales, luego de una serie de correcciones geométricas y radiométricas necesarias debido a los efectos topográficos y atmosféricos de la Tierra, son un insumo fundamental para la obtención de información temática, ya sea mediante interpretación visual directa o mediante el empleo de programas computacionales para el procesamiento de imágenes satelitales. El empleo de índices y ratios se usa ampliamente en el análisis de los elementos que componen la superficie terrestre, el NDVI o índice de vegetación permite determinar la existencia de masas vegetales, el NDSI o índice de hielo permite determinar las áreas cubiertas con hielo/nieve, el NDWI permite determinar los límites de cuerpos de agua; en general, existen muchos otros índices.

Existen también diferentes técnicas de clasificación automática de imágenes satelitales como la clasificación supervisada, no supervisada y técnicas de mapeo de materiales que permiten identificar de manera precisa y rápida la composición de los elementos de la superficie terrestre.

Los sensores activos que trabajan con LIDAR o RADAR son actualmente sistemas en franco desarrollo para el análisis del territorio, sobre todo en ambientes glaciares y periglaciares. LIDAR emplea pulsos de luz polarizada entre el violeta y el infrarrojo cercano y como transmisor un láser, tiene gran aplicación en estudios topográficos y de biomasa vegetal. Los sistemas de RADAR son radiómetros activos de microondas que operan con bandas de microondas entre 0.1 cm y 1 m, orientados a la adquisición de imágenes, medición de distancias y detección de vientos, siendo los primeros los más utilizados con aplicaciones en la generación de modelos topográficos o modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) y medición de desplazamientos (Chuvieco, 2010).

La dimensión espacial de los sensores remotos está relacionada a la escala de trabajo, es decir, el nivel de detalle que puede ser detectado. Los avances tecnológicos en la actualidad están orientados a lograr altos niveles de detalle por debajo del metro para muchos sensores multispectrales. Un mejor nivel de detalle en la detección de las características del territorio permite mayor exactitud en los resultados de los modelamientos y producción de cartografía temática, por lo tanto, la toma de mejores decisiones. Muchos tipos de sensores se han empleado en ambientes de montaña desde imágenes satelitales de resolución espacial media (alrededor de 30 m), fotografías aéreas, sensores LIDAR y RADAR para diferentes aplicaciones como inventarios glaciológicos, estudios hidrológicos, de riesgos, etc. Actualmente el desarrollo acelerado de la tecnología UAV (unmanned aerial vehicle) ha puesto a disposición de los usuarios al alcance de imágenes de muy alta resolución espacial del orden de los centímetros a costos accesibles.

La resolución radiométrica consiste en el nivel de detalle en la recolección de información radiométrica expresada en el número de niveles de gris que puede registrar un sensor en cada banda espectral. Evidentemente a mayor resolución espectral es posible diferenciar mejor los diversos tipos de elementos de la superficie terrestre como, por ejemplo, diversos tipos de glaciares, cambios en el uso actual de tierras, etc.

Los sensores remotos tienen la capacidad de volver a capturar información de la misma parte del territorio en diferentes períodos de tiempo, con variaciones en función al tipo de sensor. Los sensores satelitales tienen un período regular de revisitas sobre un mismo punto de la Tierra, siendo posible la programación en la captura de imágenes. Sensores aerotransportados y UAV pueden ser también desplegados en diferentes períodos de tiempo a discreción de los especialistas. A este hecho se denomina resolución temporal y es una característica fundamental para el estudio de la evolución temporal de los fenómenos sobre la superficie terrestre como el retroceso glaciar, el crecimiento de los cuerpos de agua, la ocupación paulatina de áreas expuestas a peligros, etc.

Complementariamente, los sistemas de Información Geográfica (SIG) tienen la capacidad de realizar análisis integrados empleando información espacial y alfanumérica (atributos). Estos sistemas toman los resultados de disciplinas como la teledetección, topografía, cartografía y otras generadoras de información espacial y temática integrándolos de manera sistemática para la obtención de información enriquecida orientada a la toma de decisiones. Los SIG facilitan las operaciones de entrada de datos, digitalización, vectorización, correcciones, etiquetado; operaciones cuyos resultados permiten la ejecución de consultas y búsquedas tanto temáticas como espaciales, análisis estadísticos diversos, análisis

espacial de distancia, proximidad, medición de magnitudes, análisis de vecindad y conectividad, análisis de redes, operaciones de reclasificación y superposición (Bosque, 2000).

Este conjunto de herramientas otorga a los SIG enormes capacidades de análisis aplicados a diversas disciplinas, entre ellas, a la gestión de riesgos en especial en ambientes de alta montaña generalmente de acceso difícil y con disponibilidad de información limitada.

Un aspecto resaltante de los SIG es su capacidad de realizar modelamiento espacial, en particular, de peligros potenciales de origen glaciar. Se han desarrollado modelos como el MSF (Modified Single Flow Direction) y MF (Multiple Flow Direction) basados en el algoritmo D8 que emplea un modelo de elevación digital para sus cálculos (Huggel, 2004). Los sistemas de información geográfica tienen la capacidad de capturar los resultados de programas de modelamiento de flujos especializado como FLOW-3D, FLO-2D, RAMMS, MIKE11, HEC-RAS entre otros.

Los SIG poseen también la capacidad de implementar técnicas de análisis estadístico espacial como la Evaluación Multicriterio (EMC) y diversos tipos de regresión (simple, múltiple, logística, tendencias, etc), modelado de tendencias de cambio, geoestadística, entre otros. Esta capacidad se debe a su potencia para el análisis integrado de muchas variables simultáneamente, otorgándoles la dimensión espacial, característica que permite su aplicación en áreas como el ordenamiento y planificación, la localización de equipamientos, impacto ambiental, gestión de riesgos, etc.

2.4. Marco Conceptual

Aluvión: Desplazamiento violento de una gran masa de agua con mezcla de sedimentos de variada granulometría y bloques de roca de grandes dimensiones. Se desplazan con gran velocidad a través de quebradas o valles en pendiente, debido a la ruptura de diques naturales y/o artificiales o desembalse súbito de lagunas, o intensas precipitaciones en las partes altas de valles y quebradas (INAIGEM, 2018).

Cambio climático: Variación del estado del clima identificable (p. ej., mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (IPCC, 2014).

Crecimiento urbano: Aumento de población e infraestructura de los centros urbanos que se va expandiendo cada vez más. El ritmo de crecimiento de la población urbana depende del aumento natural de la población urbana ya sea por la migración de personas desde las áreas rurales a la ciudad o por la reclasificación de áreas rurales en áreas urbanas (Arkiplus, 2019).

Geomática: Un enfoque sistémico, multidisciplinario e integrado para seleccionar los instrumentos y técnicas apropiadas para recopilar, almacenar, integrar, modelar, analizar, transformar, publicar y distribuir datos espacialmente geo-referenciados de diferentes fuentes, considerando la informática como un elemento decisivo en el desarrollo de estas tareas (UdeC, 2019).

Gestión de riesgos de desastres: La Gestión del Riesgo de Desastres es un proceso social cuyo fin último es la prevención, la reducción y el control permanente de los factores de riesgo de desastres en la sociedad, así como la adecuada preparación y respuesta ante situaciones de desastre, considerando las políticas nacionales con especial énfasis en aquellas relativas a materia económica, ambiental, de seguridad, defensa nacional y territorial de manera sostenible (MDI-MPH, 2018).

Glaciar: Es un cuerpo constituido de hielo y nieve ubicado en las cabeceras de cuenca que tiene un movimiento por efecto de la gravedad, cuya superficie tiende a disminuir por efectos de la fusión de su masa debido a las altas temperaturas (INAIGEM, 2018).

Movimientos de masa: Procesos de movilización lenta o rápida que involucran suelo, roca o ambos, causados por exceso de agua en el terreno y/o por efecto de la fuerza de gravedad (CENEPRED, 2014).

Peligro: Probabilidad de que un fenómeno, potencialmente dañino, de origen natural, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos (CENEPRED, 2014).

Riesgo: El riesgo es resultado de relacionar un peligro, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos y consecuencias sociales, económicas y ambientales asociadas a uno o varios fenómenos peligrosos. Cambios en uno o más de estos parámetros modifican el riesgo en sí mismo, es decir, el total de pérdidas esperadas y las consecuencias en un área determinada (CENEPRED, 2014).

Vulnerabilidad: Susceptibilidad de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas, de sufrir daños por acción de un peligro o amenaza (CENEPRED, 2014).

CAPITULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Ámbito

El ámbito de la investigación es la ciudad de Huaraz con coordenadas 222,365E – 8'945,540S a una altitud de 3,065 m s.n.m. y su área periférica dentro de una zona de análisis o estudio con 25.583 km². Pertenece al departamento de Ancash, provincia de Huaraz y comprende los distritos de Huaraz e Independencia separados por el río Quillcay. El núcleo histórico de la ciudad se ubica adyacente al Este del río Santa con zonas urbano marginales al Oeste de este río y en todo el perímetro de la ciudad.

3.2. Escala y sistema de referencia espacial

La escala de trabajo es 1/10,000 y el sistema de referencia espacial empleado fue el World Geodetic System 1984 (WGS84) Zona 18 Sur con un sistema de coordenadas UTM y código European Petroleum Survey Group (EPSG) 32718. El mapa base a escala 1/10,000 se obtuvo a partir de las cartas topográficas a escala 1/25,000 de la Dirección General de Saneamiento de la Propiedad Agraria y Catastro Rural de Ministerio de Agricultura y Riego (hojas 19i-III-SO, 20i-IV-NO, 19h-II-SE, 20h-I-NE); así como del Plano Básico Catastral de la ciudad de Huaraz de la Oficina de Catastro de la Municipalidad Provincial de Huaraz del año 2004.

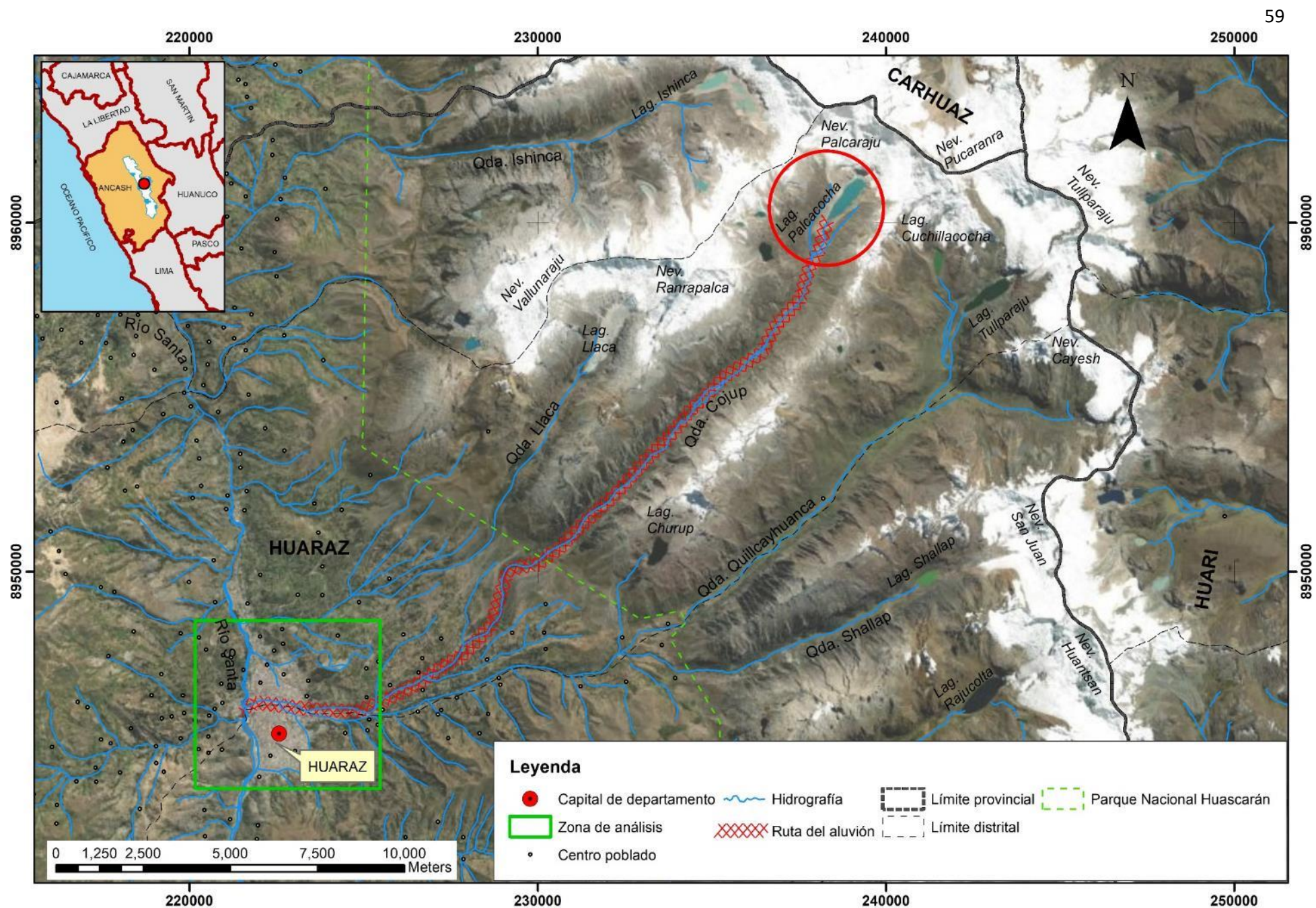


Figura 26. Ubicación de la ciudad de Huaraz. Elaborado por el autor.

3.3. Hipótesis General

El crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz y la ocupación paulatina de áreas aluviónicas desde el año 1941 hasta el año 2018 ha contribuido a incrementar el nivel de riesgo de la población frente a un aluvión potencial de origen glaciar.

3.4. Hipótesis Específicas

- El crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz desde el año 1941 hasta el año 2018 ha evolucionado espacialmente dando lugar a la ocupación paulatina de áreas expuestas a un potencial aluvión de origen glaciar.
- Existen niveles de peligro de bajo a muy alto debido a la ocurrencia potencial de un aluvión de origen glaciar en la ciudad de Huaraz.
- La tendencia en el nivel de riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente al peligro de un aluvión de origen glaciar es al incremento.

3.5. Identificación de Variables

Cuadro 3. Identificación de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL
DEPENDIENTE	
<p>Riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente a un aluvión de origen glaciar.</p>	<p>El riesgo es resultado de relacionar un peligro, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos y consecuencias sociales, económicas y ambientales asociadas a uno o varios fenómenos peligrosos. Cambios en uno o más de estos parámetros modifican el riesgo en sí mismo, es decir, el total de pérdidas esperadas y las consecuencias en un área determinada (CENEPRED, 2014).</p>
INDEPENDIENTE	
<p>Vulnerabilidad de la población de la ciudad de Huaraz debida al crecimiento urbano desde el año 1941 hasta el año 2018.</p>	<p>Susceptibilidad de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas, de sufrir daños por acción de un peligro o amenaza. Está determinada por la exposición, fragilidad y resiliencia (CENEPRED, 2014).</p>
<p>Peligro de ocurrencia un aluvión de origen glaciar.</p>	<p>Probabilidad de que un fenómeno, potencialmente dañino, de origen natural, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos (CENEPRED, 2014).</p>

Fuente: Elaborado por el autor.

3.6. Operacionalización de Variables

Cuadro 4. Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL
DEPENDIENTE	
Riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente a un aluvión de origen glaciar.	Aplicación de técnicas de análisis espacial mediante sistemas de información geográfica (SIG) para la integración de las variables de peligro y vulnerabilidad para la obtención de diferentes escenarios multitemporales de riesgo, así como reportes estadísticos y mapas.
INDEPENDIENTE	
Vulnerabilidad de la población de la ciudad de Huaraz debida al crecimiento urbano desde el año 1941 hasta el año 2018.	Obtención, aplicación de realces y correcciones geométricas de fotografías aéreas e imágenes satelitales mediante software geomático especializado (procesamiento de imágenes y Sistemas de Información Geográfica). Análisis de cartografía y documentos históricos y actuales sobre la evolución del crecimiento urbano de la ciudad. Aplicación de técnicas de interpretación visual y vectorización. Aplicación de técnicas estadísticas de regresión y evaluación Multicriterio (EMC).
Peligro de ocurrencia un aluvión de origen glaciar.	Recopilación, análisis y sistematización de información cartográfica y descriptiva de estudios previamente realizados por entidades especializadas. Integración de la información a un Sistema de Información geográfica (SIG) y aplicación de técnicas de análisis espacial.

Fuente: Elaborado por el autor

3.7. Matriz de Consistencia

Cuadro 5. Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS
Problema general ¿Cuál es la influencia del crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz y la ocupación paulatina de áreas aluviónicas desde el año 1941 hasta el año 2018, sobre el nivel de riesgo de la población frente a un aluvión potencial de origen glaciar?	Objetivo general Determinar la influencia del crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz y la ocupación paulatina de áreas aluviónicas desde el año 1941 hasta el año 2018, sobre el nivel de riesgo de la población frente a un aluvión potencial de origen glaciar.	Hipótesis general El crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz y la ocupación paulatina de áreas aluviónicas desde el año 1941 hasta el año 2018 ha contribuido a incrementar el nivel de riesgo de la población frente a un aluvión potencial de origen glaciar.	Variable Dependiente <ul style="list-style-type: none"> Riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente a un aluvión de origen glaciar. 	<ul style="list-style-type: none"> Aplicación de técnicas de análisis espacial mediante sistemas de información geográfica (SIG) para la integración de las variables de peligro y vulnerabilidad para la obtención de diferentes escenarios multitemporales de riesgo, así como reportes estadísticos y mapas. Pesquisa y análisis documental de estudios especializados. Integración de la información a un Sistema de Información Geográfica (SIG). Obtención y procesamiento de fotografías aéreas e imágenes satelitales. Interpretación visual y vectorización. Aplicación de técnicas estadísticas de regresión y evaluación Multicriterio (EMC). Análisis de cartografía y documentos sobre la evolución del crecimiento urbano y peligros de origen glaciar. Integración a un Sistema de Información Geográfica (SIG).
Problemas específicos ¿Cómo ha evolucionado espacialmente el crecimiento urbano en la ciudad de Huaraz desde el año 1941 hasta el año 2018, como condición de vulnerabilidad?	Objetivos específicos Analizar la evolución espacial del crecimiento urbano en la ciudad de Huaraz desde el año 1941 hasta el año 2018, como condición de vulnerabilidad.	Hipótesis específicas El crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz desde el año 1941 hasta el año 2018 ha evolucionado espacialmente dado lugar a la ocupación paulatina de áreas expuestas a un potencial aluvión de origen glaciar.	Variables Independes <ul style="list-style-type: none"> Vulnerabilidad de la población de la ciudad de Huaraz debida al crecimiento urbano desde el año 1941 hasta el año 2018. 	
¿Cuáles son los niveles de peligro por la ocurrencia de un aluvión de origen glaciar existentes en la ciudad de Huaraz?	Determinar los niveles de peligro por la ocurrencia de un aluvión de origen glaciar existentes en la ciudad de Huaraz.	Existen niveles de peligro de bajo a muy alto debidos la ocurrencia potencial de un aluvión de origen glaciar en la ciudad de Huaraz.	<ul style="list-style-type: none"> Peligro de ocurrencia un aluvión de origen glaciar. 	
¿Cuál es la tendencia en el nivel de riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente al peligro de un aluvión de origen glaciar?	Estimar las tendencias en el nivel de riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente al peligro de un aluvión de origen glaciar.	La tendencia en el nivel de riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente al peligro de un aluvión de origen glaciar es al incremento.		

Fuente: Elaborado por el autor

3.8. Tipo y Diseño de Investigación

La presente investigación es de tipo no experimental (ex pos-facto). El diseño de la investigación es longitudinal de tendencias.

3.9. Unidad de Análisis

La investigación toma como unidad de análisis la población de las áreas urbanas y periurbanas de ciudades localizadas en zonas aluviónicas asociadas a cuencas de origen glaciar.

3.10. Población de Estudio

Corresponde a las áreas urbanas y periurbanas de la ciudad de Huaraz, en la zona aluviónica en la subcuenca del río Quillcay y áreas adyacentes todas estas dentro de la zona de análisis definida con un rectángulo de 5312.8 m por 4815.4 m con un área de 25.583 km² entre las coordenadas 220169.2N-8948596.8E (vértice Noroeste) y 225482.0N-8943781.4E (vértice Sudeste).

3.11. Tamaño y Selección de la Muestra

Dadas las características de la presente investigación no se tomará una muestra representativa, se realizará sobre toda la población de estudio.

3.12. Técnicas de Recolección de Datos

3.12.1. Variable Dependiente: Riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente a un aluvión de origen glaciar.

Se realizó una pesquisa documentaria de estudios y cartografía de riesgo por aluviones realizados en la ciudad de Huaraz útiles para el desarrollo de la investigación tales como el Plan de

Prevención y Reducción de Riesgos de Desastres de la Subcuenca Quillcay 2018-2021, así como el Modelo de Inundación por Potencial Aluvión desde la Laguna Palcacocha, Huaraz, Perú realizado por la Universidad de Texas en el marco de los proyectos HIMAP e IMACC Quillcay. Se efectuaron reconocimientos de campo a fin de verificar la coherencia de la información obtenida.

3.12.2. *Variable Independiente: Vulnerabilidad de la población de la ciudad de Huaraz debida al crecimiento urbano desde el año 1941 hasta el año 2018.*

Se efectuó una búsqueda de información geomática como fotografías aéreas, imágenes satelitales y mapas actuales e históricos a partir de los cuales se analizó el crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz entre los años 1941 y 2018, efectuándose posteriormente un reconocimiento de campo para identificar puntos de interés para los trabajos de análisis. La escala de trabajo empleada fue de 1/10,000, teniendo en cuenta una unidad mínima cartografiable de 4 mm², se emplearon imágenes con una resolución espacial de 20 metros de pixel o superior. Las imágenes no presentaban nubosidad en la zona de an. Se emplearon fotografías aéreas históricas y actuales pancromáticas en blanco y negro y a color obtenidas por entidades como United States Air Force (USAF), la Fuerza Aérea Peruana (FAP), United States Geological Survey (USGS) y otras entidades que desarrollaron estudios en la zona. Se emplearon también imágenes de alta resolución Google Earth Pro.

Las fotografías aéreas fueron obtenidas del Servicio Aerofotográfico Nacional (SAN) de la Fuerza Aérea Peruana (FAP), el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Las imágenes de satélite y modelo de elevación

digital de obtuvo de la plataforma de descarga EarthExplorer de USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). La información cartográfica urbana y sobre catastro, fue obtenida de la Municipalidad Provincial de Huaraz. La cartografía base obtuvo a partir de las Cartas Topográficas 1/25,000 de las Oficinas de Catastro Rural del Ministerio de Agricultura integrada con la información catastral obtenida de la Municipalidad Provincial de Huaraz. La información sobre la población y vivienda fue obtenida de la base de datos de censos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Se obtuvo información documentaria histórica sobre la ciudad de Huaraz de entidades como la Biblioteca Municipal de Huaraz y de estudios históricos locales e investigadores locales.

3.12.3. *Variable Independiente: Peligro de ocurrencia un aluvión de origen glaciar.*

Se realizó una búsqueda y análisis documentario para la obtención de estudios e investigaciones que contengan información tanto cartográfica como descriptiva sobre las condiciones de peligro por un potencial aluvión de origen glaciar en la ciudad de Huaraz. La información obtenida fue verificada, en lo relacionado a la validez de su origen, y verificada en campo. En la zona de investigación se han realizados diversos estudios modelando el posible recorrido de un aluvión originado en las lagunas ubicadas en la cabecera de cuenca del río Quillcay tales como Palcacocha, Cuchillacocha, y Tullparaju; la información obtenida fue la siguiente:

- Año 2003 – Mapa de peligros dentro de los que se considera el peligro de aluvión elaborado por INDECI como parte del proyecto Ciudades Sostenibles.

- Año 2004 – Mapa de vulnerabilidad en caso de aluvión, elaborado por la Municipalidad Provincial de Huaraz como parte del Catastro Urbano de la Ciudad de Huaraz.
- Año 2014 – Modelo de peligro de aluvión elaborado dentro de los proyectos HIMAP e IMACC Quillcay desarrollados por el MINAM, BID, la Universidad de Texas y el Instituto de Montaña.
- Año 2016 – Modelo de peligro de aluvión elaborado por las universidades de Texas y Zúrich como parte del proyecto Glaciares+ ejecutado por CARE PERÚ.

3.13. Análisis e Interpretación de la Información

3.13.1. *Variable Dependiente: Riesgo de la población de la ciudad de Huaraz frente a un aluvión de origen glaciar.*

Se emplearon técnicas de Análisis espacial, específicamente álgebra de mapas, superposición cartográfica y consultas mediante sistemas de información geográfica (SIG) para la integración de las variables de peligro (mapa de peligro y zona aluviónica) y vulnerabilidad por exposición (modelos de crecimiento urbano histórico y prospectivo mediante regresión logística y Evaluación Multicriterio) correspondiente a los diferentes escenarios multitemporales. La función básica empleada en el análisis fue:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad}$$

Estas dos variables se emplearon como criterios para su integración mediante SIG. Se asignó la misma ponderación a cada variable y se definieron de las reglas de decisión, realizándose consultas por localización y atributos para la obtención de reportes, estadísticas y mapas para la obtención final de las conclusiones.

3.13.2. Variable Independiente: Vulnerabilidad de la población de la ciudad de Huaraz debida al crecimiento urbano desde el año 1941 hasta el año 2018.

La información geomática obtenida como imágenes de satélite, fotografías aéreas y mapas; fue ordenada, almacenadas y registradas en un sistema de metadatos de la investigación detallando información como nombre del archivo, ubicación, tipo, fuente, escala y descripción. Las imágenes de satélite y fotografías aéreas fueron sometidas a procesos de corrección geométrica a fin de corregir las deformaciones debidas al relieve y homogeneizar espacialmente las capas de información geomática. El sistema de referencia espacial empleado fue el WGS84 Zona 18 Sur con un sistema de coordenadas UTM (EPSG: 32718). El mapa base empleado se obtuvo a partir de las cartas topográficas de Catastro Rural del Ministerio de Agricultura a escala 1/2,500 integrada con la información del Catastro Urbano de la ciudad de Huaraz, sobre las que se aplicaron técnicas de corrección topológica y reproyección.

Sobre las imágenes corregidas se aplicarán técnicas de vectorización para la extracción de información temática, es decir, el crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz y de las zonas pobladas aledañas, así como la infraestructura asociada desde el año 1941 hasta el año 2018. Se emplearon técnicas de interpretación visual en base al análisis se patrones, texturas, sombras y colores sobre las fotografías aéreas e imágenes satelitales en blanco y negro y a color. Los resultados preliminares obtenidos fueron contrastados mediante la verificación en campo en la zona de investigación en puntos diversos en función a los resultados obtenidos para efectuar aplicarán las correcciones que fueran necesarias. La información estadística y descriptiva sobre población, vivienda e infraestructura fue ordenada y registrada en el sistema de

información. Se empleó para enriquecer el análisis de la información cartográfica en el Sistema de Información Geográfica.

Se emplearon técnicas análisis espacial para estudiar la evolución del crecimiento de la ciudad y las zonas pobladas asociadas, así como sus tendencias de crecimiento en base a criterios como la orientación y distancia con respecto al centro de la ciudad, altitud y pendientes. Se aplicaron también técnicas estadísticas como la regresión logística para modelar las probabilidades de crecimiento de nuevas áreas urbanas, así como técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) a fin de modelar las áreas potenciales para la acogida de nuevas zonas urbanas.

3.13.3. *Variable Independiente: Peligro de ocurrencia un aluvión de origen glaciar.*

La información sobre peligro de aluviones en la ciudad de Huaraz fue organizada y registrada en una base de metadatos que contendrá información como nombre del archivo, ubicación, tipo, fuente, escala y descripción. Posteriormente la información cartográfica fue homogeneizada e ingresada al sistema de Información geográfica empleando técnicas de importación/exportación, digitalización, vectorización, corrección geométrica y asignación de atributos. La información estadística y descriptiva se empleó para alimentar la base atributos en Sistema de Información geográfica y como fuente de análisis y discusión para enriquecer la investigación.

Los resultados obtenidos fueron controlados mediante reconocimiento de campo empleando un equipo GPS navegador y cartografía preliminar impresa efectuándose posteriormente las correcciones pertinentes para lograr los resultados finales en forma de mapas y reportes estadísticos.

3.14. Técnicas empleadas

3.14.1. Corrección geométrica

Las fotografías aéreas obtenidas en medio físico fueron digitalizadas mediante escaneo a una resolución de 600 dpi en formato TIFF con una resolución radiométrica de 16 bit. La imagen satelital USGS EROS y las fotografías satelitales de Google Earth fueron obtenidas en formato digital. Todas estas fuentes geomáticas al ser de diverso origen poseen diferentes escalas, resoluciones espaciales y presentan deformaciones propias del sensor que las obtuvo, por ello se efectuó un proceso de corrección geométrica a fin de homogeneizar todas las imágenes a un solo patrón, en nuestro caso, el mapa base a escala 1/10,000.

Para construir el mapa base se trabajó con los mapas topográficos 1/25,000 y el Plano Básico Catastral a escala 1/10,000; ambas fuentes en formato DWG y con el sistema de referencia espacial Provisional para Sudamérica 1956 (PSAD56) en coordenadas UTM Zona 18 Sur. Las capas de información vectorial fueron importadas al formato SHP y posteriormente, mediante operaciones de consulta por atributos se separaron las capas de vías, curvas de nivel, cumbres, red hidrografía, centros poblados, manzanas y lotes de las zonas urbanas de ambas fuentes a las que se aplicaron correcciones topológicas para eliminar errores en la información vectorial y se asignaron atributos de elevación a las curvas de nivel. Las capas resultantes fueron reproyectadas al sistema WGS84 UTM Zona 18 Sur mediante un software SIG.

Teniendo como referencia espacial el mapa base se procedió a la corrección geométrica de las imágenes tomando como base la imagen de Google Earth del año 2018 que fue obtenida georrefenciada verificándose en campo y gabinete su correcto

ajuste espacial con el mapa base mediante la comparación de puntos de control.

Dada la antigüedad de las fotografías aéreas obtenidas, la resolución de escaneo y la pérdida de información de las condiciones de captura de la imagen (tipo de cámara, altura de vuelo, marcas fiduciales, etc.) indispensables para un proceso de ortorectificación fotogramétrica, se optó por efectuar correcciones geométricas de tipo spline luego de probar correcciones polinómicas de tercer orden con las que no se lograba un buen ajuste espacial. La corrección se trabajó de imagen a imagen con puntos de control densos a fin de obtener visualmente y con verificación de campo un correcto ajuste espacial.

La corrección o transformación de tipo spline o thin plate spline (TPS) se conoce como un método “hoja de jebe” iterativo que optimiza el ajuste entre los puntos de referencia y aquellos a corregir, es decir asegura un adecuado ajuste local pero no garantiza un ajuste global en toda la imagen, por ello es fundamental el uso de numerosos y precisos puntos de control siendo diez su número mínimo. Esta transformación emplea la ecuación de ajuste siguiente:

$$f(x, y) = a_1 + a_x x + a_y y + \sum_{i=1}^p w_i U(\|(x_i, y_i) - (x, y)\|)$$

Donde a_1, a_x, a_y son coeficientes de corrección, p el número de puntos, $U = r^2 \log r$, $r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$. x, y son las coordenadas de referencia y x_i, y_i son las nuevas coordenadas que van aproximándose iterativamente (Donato & Belongie, 2002). Para evaluar la calidad de la corrección geométrica se comparan las coordenadas de los puntos corregidos con los de referencia hallando el promedio de los valores residuales

conocido como error cuadrático medio (Root Mean Squared Error - RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1,n}((\hat{x}_i - x_i)^2 + (\hat{y}_i - y_i)^2)}{n - 1}}$$

Donde \hat{x}_i, \hat{y}_i son las coordenadas de referencia, x_i, y_i son las coordenadas corregidas y n es el número de puntos (Chuvieco, 2010). Dadas las características de la corrección geométrica spline, los valores de RMSE obtenidos son reducidos para cada punto hecho que no necesariamente garantiza un correcto ajuste para el resto de la imagen, para garantizar una adecuada corrección es necesaria la ubicación de muchos puntos de control.

Las imágenes corregidas geométricamente fueron sometidas a procesos de corte y realce visual para su interpretación. El corte de cada imagen se ejecutó en base a la zona de análisis a través de un programa SIG con capacidades de procesamiento de imágenes. El realce visual consistió en el ajuste del brillo y contraste mediante las opciones automáticas de visualización del software SIG. Para las imágenes de 1948, 1962 y 1977 se buscó lograr la mejor observación de las diferencias de los tonos de gris y para las imágenes en color de los años 2001 y 2018 se trabajó en color natural buscando hacer visibles las diferencias de color. En muchos casos fue necesario aplicar ajustes de brillo y contraste de manera interactiva. El método empleado en todos los casos fue la expansión lineal del contraste que emplea la siguiente relación:

$$NV = a + b(ND)$$

Donde NV es el valor de nuevo valor de visualización de cada pixel, a es el sesgo, b la ganancia y ND el nivel digital original de cada pixel de la imagen (Chuvieco, 2010). Para la escena de 1948 se emplearon dos imágenes, por lo que se creó un mosaico con ajuste del contraste entre las imágenes.

3.14.2. Interpretación de imágenes

Para aplicar el proceso de vectorización, es decir transformar la información en formato ráster sobre el crecimiento de las zonas urbanas o pobladas de las imágenes a vectores (polígonos) fue necesario interpretar las imágenes. Existen dos tipos de interpretación de imágenes visual o analógica y digital, para la presente investigación se empleó la interpretación visual debido a que las imágenes empleadas son pancromáticas, no poseen bandas multiespectrales que permitan aplicar métodos de clasificación automática. Se probaron métodos de segmentación sin buenos resultados, por ello se optó finalmente por la interpretación visual y vectorización manual asistida por las capacidades de visualización del software SIG para la mejora del brillo y contraste, así como mediante la verificación de campo. La interpretación visual hace uso de ciertos criterios que se organizan en la siguiente figura:

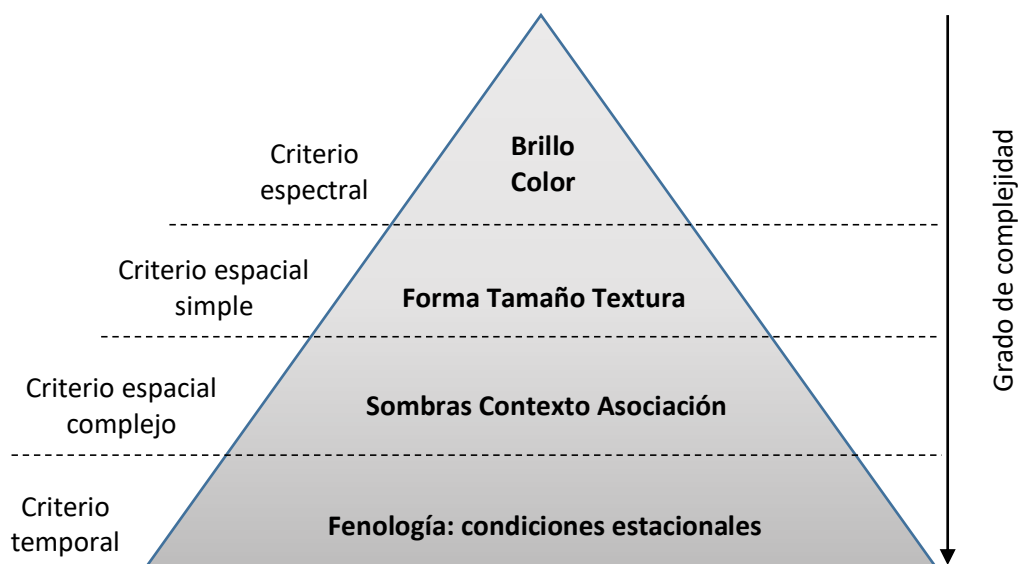


Figura 27. Organización de los criterios de interpretación visual de imágenes. Tomado de Teledetección ambiental 2010 (Chuvieco, 2010).

Todos estos criterios fueron utilizados para la interpretación de las imágenes de manera integrada en el proceso de vectorización siendo el brillo y el color los más elementales pues

permiten diferenciar tipos de cobertura del territorio. La forma, tamaño y textura muestran las propiedades espaciales de los elementos observados al igual que las sombras, contexto y asociación adicionando a estas últimas las relaciones con los elementos cercanos. La fenología se refiere al período del año en el que se capturaron las imágenes y tiene relación con las sombras, vegetación, nubosidad, etc. (Chuvieco, 2010).

Cada una de las capas vectoriales obtenidas para cada año fue finalmente revisada en relación a las otras corrigiendo errores topológicos como la aparición de falsos polígonos, eliminación de polígonos no representativos por área en función a la escala de trabajo e inconsistencias en el ajuste espacial con otras capas como la red hidrográfica, vías y con los polígonos de los otros años. Todas las capas de áreas urbanas/pobladas fueron cortadas en base a los límites de la zona de análisis.

3.14.3. Medición de la distribución geográfica

En base a los polígonos corregidos para cada año se creó una nube densa de puntos aleatorios mediante un programa SIG tomando como área mínima 5 m^2 y una separación mínima entre puntos de 2.24 m distancia correspondiente a la raíz cuadrada del área mínima. Se tomó la decisión de usar 5 m^2 como el área mínima de los polígonos urbanos/poblados a ser considerados como parte de las capas de información anual en base al análisis de los elementos vectorizados que en algunas áreas urbano marginales y rurales tenían áreas menores que no eran representativas de zonas pobladas hecho que fue verificado en campo.

Con el objetivo de empezar a medir la orientación y dirección del crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz entre 1941 y 2018 se calculó inicialmente el centro medio (o centro de mínima

distancia) correspondiente a cada una de las capas de nubes de puntos. El centro medio es un punto que representa la coordenada x e y promedio de todos los elementos en la capa analizada y suele emplearse en el seguimiento y comparación de cambios en la distribución de elementos (Mitchell, 2005). La evolución de los centros medios obtenidos muestra inicialmente cómo fue evolucionando la dirección de crecimiento de la ciudad de Huaraz. El centro medio se calcula mediante las siguientes relaciones:

$$\bar{X} = \frac{\sum_i X_i}{n} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_i Y_i}{n}$$

Donde X_i e Y_i representan las coordenadas de cada punto y n el número de puntos. Con la misma técnica se calculó posteriormente el centro medio de los centros medio denominado centro medio global.

Posteriormente se calcularon las elipses de desviación estándar para cada nube de puntos como otra técnica para analizar la orientación y dirección del crecimiento de la ciudad. Estas elipses miden la desviación estándar de cada punto a partir del centro medio tanto para la coordenada x como para y empleando las siguientes funciones:

$$SD_x = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad SD_y = \sqrt{\frac{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2}{n}}$$

Donde X_i e Y_i representan las coordenadas de cada punto y n el número de puntos, \bar{X} e \bar{Y} representan las coordenadas promedio. Los ejes de la elipse se construyen en dirección Este-Oeste y Norte-Sur y su longitud corresponde al doble de la desviación estándar. La elipse tiene un ángulo de rotación que ajusta la posición de cada eje de modo que minimice su distancia con respecto a los puntos de la capa analizada (Mitchell, 2005).

El tamaño de la elipse estima la zona con mayor concentración de puntos y su orientación estima su distribución, esta información resulta útil al analizar cómo fue creciendo la ciudad tanto en tamaño como en dirección.

3.14.4. Análisis espacial

A fin de profundizar en el análisis del crecimiento de la ciudad en áreas más específicas se decidió emplear variables espaciales que aportan información sobre las características de las áreas urbanas o pobladas y sus cambios en cada año o escenario en estudio, se trata de capas de información ráster con una resolución espacial de 1 metro de pixel obtenidas mediante operaciones de análisis espacial con un programa SIG:

- Dirección con respecto al centro medio global: Capa ráster en la que cada pixel toma un valor entre 0° y 360° que muestra su dirección con respecto al centro medio global.
- Distancia desde el centro medio global: Capa ráster que otorga a cada pixel un valor en metros que muestra su distancia con respecto al centro medio global
- Altitud: Modelo ráster en el que los pixeles toman valores de elevación en m s.m.n. Para obtener esta capa de información inicialmente se trabajó con las capas de curvas de nivel y cumbres de las cartas topográficas a escala 1/25,000 para la construcción de un Modelo de Elevación Digital (DEM) observándose que no era sensible a ciertas características del relieve en la zona de análisis esto debido a la baja densidad de las curvas de nivel con una equidistancia en z de 25 m, por ello se decidió emplear un modelo de elevación digital construido en base a imágenes de RADAR del sensor japonés Alos Palsar lanzado en enero del año 2006. El DEM empleado tiene el código AP_27249_FBS_F6990_RT1 en

formato GeoTIFF con una resolución espacial de 12.5 m y corresponde a la escena ALPSRP272496990 capturada el 03/07/2011 que se obtiene de la plataforma Vertex de Alaska Satellite Facility (ASF) – NASA (<https://search.asf.alaska.edu/#/>) y está georreferenciada al sistema WGS84 Zona 18 Sur. Se empleó este DEM debido a su alta resolución espacial y a que no es de interés de la investigación conocer las elevaciones absolutas en la zona de análisis sino la sensibilidad a los cambios en el relieve característica del DEM AP_27249_FBS_F6990_RT1 que se verificó en campo, el DEM fue finalmente cortado tomando como patrón la zona de análisis.

- Pendiente: Capa ráster en la que los píxeles asumen valores de pendiente en porcentaje ($(\Delta Z/\Delta X) \cdot 100$, $45^\circ = 100\%$, $90^\circ = \infty$). Se calculó en base al modelo de elevación digital AP_27249_FBS_F6990_RT1 cortado a los límites de la zona de análisis.
- Densidad de puntos: Capa ráster obtenida a partir de una nube de puntos integrada de los años 1948 al 2018 en la que los píxeles toman valores que muestran el número de puntos en un radio establecido. Esta es una capa de información auxiliar o de apoyo útil para estimar la densidad de áreas pobladas en la zona de análisis.

Todas estas variables fueron empleadas como inputs en los modelos de probabilidad de crecimiento (regresión logística) y potencial de acogida (Evaluación Multicriterio) que se ejecutarán posteriormente.

Teniendo como referencia la información sobre el crecimiento urbano histórico de la ciudad de Huaraz, era necesario analizar prospectivamente su evolución, para este fin se decidió emplear dos técnicas: regresión logística y Evaluación Multicriterio. Existen, claro está, otras técnicas de modelamiento como el

empleo de autómatas celulares, análisis fractal, análisis de Markov, entre otros; las técnicas seleccionadas han sido ampliamente empleadas en el modelamiento del crecimiento urbano y localización de equipamientos, son relativamente de menor complejidad y menos exigentes en el volumen de los datos de ingreso. El empleo de otras técnicas alternativas será materia de futuras investigaciones.

3.14.5. Regresión logística

La regresión logística binaria empleada es un método estadístico empírico prospectivo apropiado para predecir el valor de una variable binaria (toma únicamente el valor de 0 o 1) en base a variables continuas o categóricas independientes. Permite determinar el nivel de variación de la variable dependiente explicada por las variables independientes, así como su importancia relativa y los efectos de sus interacciones (Nong & Du, 2011). El supuesto básico para la aplicación de este modelo es que la probabilidad de que la variable dependiente, en nuestro caso la pertenencia a la zona urbana/poblada, tome el valor de 1 tiene un comportamiento logístico que se puede estimar mediante la siguiente función:

$$P_{(y=1 | X)} = \frac{e^{\sum BX}}{1 + e^{\sum BX}}$$

Donde P es la probabilidad de que variable dependiente sea 1, X son las variables independientes ($x_0, x_1, x_2, x_3, x_4 \dots x_k$) y B son los parámetros estimados ($b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 \dots b_k$). Debido a que las probabilidades modeladas no están linealmente relacionadas a X , es necesario linearizar la ecuación de probabilidad mediante la siguiente transformación conocida como logit o transformación logística:

$$P' = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = \sum BX$$

Ejecutando la transformación logística a ambos lados del modelo de regresión se obtiene el modelo de regresión lineal estándar:

$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + \dots + b_kx_k + error$$

Es importante anotar que P' puede tomar valores entre \pm infinito, sin embargo, P toma asegura que los valores de probabilidad varíen entre 0 y 1.

La regresión logística binomial se aplicó sobre variables espaciales a través de un software SIG especializado que empleó el método denominado Maximum Likelihood Estimation (MLE) para hallar los parámetros B .

Un requisito fundamental para aplicar el modelo de regresión logística es que las variables independientes no estén linealmente relacionadas, por ello se efectuó sobre ellas un análisis de correlación de Pearson. Las variables utilizadas en la corrida del modelo fueron la altitud, pendiente y distancia al centro medio global; no se empleó la capa de orientación por la distorsión que producía en los resultados finales ni la densidad de puntos por su alta dependencia con el mapa de cobertura urbana. Adicionalmente a fin de garantizar que las observaciones tomadas por el modelo sean independientes se tomó una muestra aleatoria del 30% para cada variable (Eastman, 2010).

Los resultados estadísticos del modelo que permiten evaluar su nivel de ajuste son (Eastman, 2010):

- Pseudo R^2 : Un valor de 1 indica un ajuste perfecto, un valor de 0 muestra que no existe ajuste. Un valor mayor a 0.2 es considerado un relativo buen nivel de ajuste.
- La bondad de ajuste que calcula las diferencias entre los datos observados y predichos, un menor valor indica un mejor nivel de ajuste relativo.
- La tabla de clasificación de casos o tabla de contingencia que relaciona los valores modelados versus los observados. La clasificación se basa en la probabilidad modelada asignando un umbral inicial como regla de decisión (0.5 inicialmente), si el valor modelado es menor que el umbral se asigna el valor de 0 al caso analizado y 1 en caso contrario. Es posible variar el umbral de modo el número de casos clasificados como 1 se ajuste al número de casos observados como 1 a fin de mejorar los valores de ajuste. Un alto porcentaje de valores 1 modelados versus valores 1 observados indica mayor precisión en el modelado.
- En base a la tabla de contingencia se calcula los odds ratio o razón de probabilidad:

Cuadro 6. Tabla de contingencia

Observado	Modelado 1	Modelado 0
1	N11	N12
0	N21	N22

Fuente. Elaborado por el autor

$$\text{Odds ratio} = (N11 * N22) / (N12 * N21)$$

Un valor de odds ratio positivo y alejado de uno indica una alta probabilidad de que los valores modelados coincidan con los observados.

- El análisis ROC (Relative Operating Characteristic) permite comparar un modelo booleano (zonas urbanas) versus un modelo de probabilidad, y es muy adecuado para evaluar la bondad de ajuste en regresiones logísticas. El índice ROC

se obtiene ploteando una curva que relacione los falsos positivos (eje x) con los verdaderos positivos (eje y) para cada umbral, siendo este valor el porcentaje de píxeles en el mapa de probabilidad a ser reclasificados como verdadero (pertenencia una zona urbana/poblada) para ser comparada con la imagen de referencia (zona urbana/poblada del año 2018), el área debajo de la curva generada es el valor ROC, si éste es 1 se considera que existe un ajuste espacial perfecto, si es igual o menor que 0.5 el ajuste es aleatorio.

Los valores de los parámetros obtenidos en el modelo logit pueden ser positivos o negativos, un valor positivo indica una relación directa con la variable dependiente y viceversa. Para analizar la importancia de cada variable independiente sobre la variable dependiente se estandarizaron los parámetros B mediante la siguiente relación (Rojas & Plata, 2010):

$$B \text{ estandarizado} = (B * \text{Desviación estándar}) / (\pi^2/3)$$

3.14.6. Evaluación Multicriterio (EMC)

El siguiente análisis realizado fue la Evaluación Multicriterio (EMC) mediante sistemas de información geográfica, se trata de una herramienta ampliamente empleada como soporte para la toma de decisiones sobre la localización de equipamientos, para nuestro caso la capacidad de acoger nueva infraestructura urbana o áreas pobladas (Buzai & Baxendale, 2011). Esta herramienta fue empleada en la presente investigación debido a su capacidad de combinar diferentes capas de información espacial, conocidos como criterios, para determinar un único índice de evaluación. Los criterios se pueden diferenciar entre factores y restricciones. Los factores incrementan o reducen la aptitud para un determinado objetivo y pueden contener

información continua o discreta. Las restricciones limitan el análisis de los factores a determinadas zonas.

La EMC puede ser de tipo booleano en el que los criterios se reducen a valores discretos que son analizados mediante operadores de intersección (AND) o adición (OR). El segundo es de tipo continuo conocido como Weighted Linear Combination (WLC), en el que los factores son estandarizados a un rango cuantitativo común y posteriormente promediados con diversas ponderaciones definidas por el usuario bajo las restricciones establecidas, resultando un modelo de idoneidad o capacidad de acogida continuo en el que lo mayores valores indican mayor idoneidad (Eastman, 2010), la siguiente ecuación resume lo señalado:

$$S = \sum w_i x_i * \tau c_j$$

Donde S es la idoneidad, w_i es el peso del factor i, x_i es el valor del criterio del factor i, c_j es el valor de la restricción j, τ es el producto de las restricciones.

El método WLC opera multiplicando cada factor por su respectivo peso sumando luego los resultados. La sumatoria de los pesos es 1, por lo tanto, el resultado integrado obtenido tiene el mismo rango que el empleado en los factores (0 a 255), de existir restricciones, éstas se multiplican por el resultado para excluir las áreas no deseadas. Una variante del WLC es el empleo de un promedio ponderado ordenado (Ordered Weighted Average - OWA) en el que se asigna una ponderación adicional a los factores que les otorga un orden en el que serán agregados en un nivel adicional de análisis que permite evaluar la idoneidad jugando con los niveles de intercambio y riesgo.

Los conceptos de intercambio y riesgo son importantes para explicar cómo operan WLC y OWA. El intercambio es la

capacidad de compensación existente entre los factores. El riesgo es la capacidad de admitir resultados extremos que pueden ser restrictivos (adversos al riesgo - operación AND) o permisivos (riesgosos - operación OR). Ambos aspectos están determinados por la segunda ponderación de orden que se asigna a los factores.

Para la presente investigación se trabajó con el método WLC sin OWA, debido a que genera un resultado intermedio evitando los escenarios extremos (ni adverso al riesgo, ni riesgoso) además de maximizar la compensación entre los factores, aspecto relevante para la investigación debido a que los valores de altos idoneidad de una variable permiten compensar los valores bajos de otras. No se aplicó la variante OWA porque se consideró que todos factores tienen el mismo peso de orden (Eastman, 2010).



Figura 28. Triángulo de decisiones estratégicas y ubicación de WLC. Tomado de IDRISI Selva Manual (Eastman, 2010).

Se emplearon los siguientes factores en la investigación, no se aplicaron restricciones:

- Altitud (m s.n.m.)
- Pendiente (%)
- Distancia con respecto al centro medio global (m)

- Densidad de puntos (puntos en un radio de 100 m²)

Es necesario precisar que el empleo de esta herramienta en la presente investigación no pretende mostrar en su resultado áreas con las mejores condiciones físicas para la instalación de nueva infraestructura urbanas/pobladas para lo que se tendría que incluir análisis de mayor complejidad que incluya información precisa de tipo geotécnico, normativo, de propiedad, riesgos, etc. El resultado de este análisis muestra las áreas con mayor o menor idoneidad o capacidad de acogida de nuevas áreas urbanas/pobladas, a la luz del comportamiento observado del crecimiento urbano y urbano marginal en relación a los factores analizados.

Para ejecutar el método WLC se implementó una estandarización continua (borrosa o fuzzy) de los factores pues tienen diferentes escalas y unidades, para pasarlos a una escala común de 0 a 255. Para la correcta asignación de los valores fuzzy se debe conocer cómo influye comportamiento del factor en el incremento o reducción de la idoneidad o capacidad de acogida, para este fin se asoció el comportamiento de cada factor a una función predefinida como la sigmoideal, en forma de J, exponencial, lineal o alguna personalizada; para nuestro caso se empleó la función sigmoideal monotónicamente creciente o decreciente debido a su uso más difundido en este tipo de análisis y a que no se cuenta con umbrales específicos para cada factor a partir de los cuales la idoneidad o capacidad de acogida de un territorio para admitir nuevas áreas urbanas/pobladas se incrementa o disminuye sus cambios son graduales, sin embargo, se asume que mientras más cercanos sean los valores de los factores en un determinado territorio con respecto a aquellos que tiene en las áreas urbanas/pobladas, se tienen altos niveles de capacidad de acogida, a medida que nos

alejamos de estos valores se reduce significativamente la capacidad de acogida del territorio.

La función sigmoideal es de la forma siguiente:

$$\mu = \text{Cos}^2 \alpha$$

En el caso de que la función sea monotónicamente decreciente:

$$\alpha = \frac{x - \text{punto } c}{\text{punto } d - \text{punto } c} * \left(\frac{\pi}{2}\right)$$

Cuando $x < \text{punto } c$, $\mu=1$

En el caso de que la función sea monotónicamente creciente:

$$\alpha = \left(1 - \frac{x - \text{punto } a}{\text{punto } b - \text{punto } a}\right) * \left(\frac{\pi}{2}\right)$$

Cuando $x > \text{punto } b$, $\mu=1$

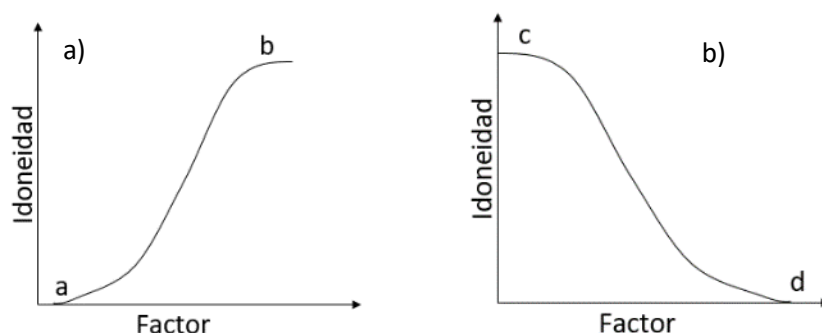


Figura 29. Función sigmoideal a) monotónicamente creciente y b) monotónicamente decreciente. Adaptado de IDRISI Selva Manual (Eastman, 2010).

Como parte del análisis WLC se ponderaron los factores estandarizados. Observando los resultados de la regresión logística resulta evidente que los criterios empleados para evaluar el crecimiento urbano en la ciudad de Huaraz no tienen el mismo peso o nivel de influencia sobre dicho proceso hecho que se comprobó con la observación de campo. Para asignar una ponderación que minimice la subjetividad en los valores asignados, se empleó el Proceso Analítico Jerárquico (Analytical Hierarchy Process - AHP) que es una técnica empleada en teoría de decisiones y EMC para resolver el problema de asignar

pesos relativos a grupos de factores de acuerdo a su importancia en a la luz de varios criterios (Saaty, 1977).

El AHP consiste en facilitar el proceso de ponderación en base a comparaciones del nivel de importancia de los factores por pares con respecto al objetivo planteado, proceso que se realiza a través de una matriz recíproca cuadrada en la que se asignan puntajes relativos a cada factor, el software SIG empleado permite elegir una escala de nueve posibles valores facilitando el análisis. En esta escala un valor mayor a 1 indica que, en relación al factor de la columna, el factor de la fila es más importante, el nivel de importancia está dado por el valor asignado. Un valor igual a 1 indica que los factores de la fila y la columna son igualmente importantes. Un valor fraccional inferior a 1 indica que, en relación al factor de la columna, el factor de la fila es menos importante, el nivel está dado por el valor asignado.

Menos importante					Más importante			
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Sumamente	Muy fuertemente	Fuertemente	Moderadamente	Igualmente	Muy fuertemente	Fuertemente	Moderadamente	Sumamente

Figura 30. Escala de puntajes de comparación para la matriz recíproca. Adaptado de IDRISI Selva Manual (Eastman, 2010).

Cuadro 7. Matriz recíproca de comparación por pares

Factores	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor n
Factor 1	1				
Factor 2		1			
Factor 3			1		
.....				1	
Factor n					1

Fuente. Adaptado de IDRISI Selva Manual (Eastman, 2010)

Sólo es necesario completar los valores en la mitad inferior de la matriz los demás valores son los recíprocos de los indicados en la mitad superior. Los valores asignados son procesados aritméticamente por el software SIG para obtener las ponderaciones de cada factor que deben sumar 1, obteniendo adicionalmente una tasa de consistencia que indica la probabilidad de que los valores asignados en la matriz recíproca se generen de manera aleatoria. Una tasa mayor a 0.1 señala que los valores asignados en la matriz deben ser reevaluados (Saaty, 1977).

Las ponderaciones o pesos obtenidos son empleados finalmente para correr el modelo WLC obteniendo los valores de idoneidad o capacidad de acogida que se muestran y discuten en los resultados.

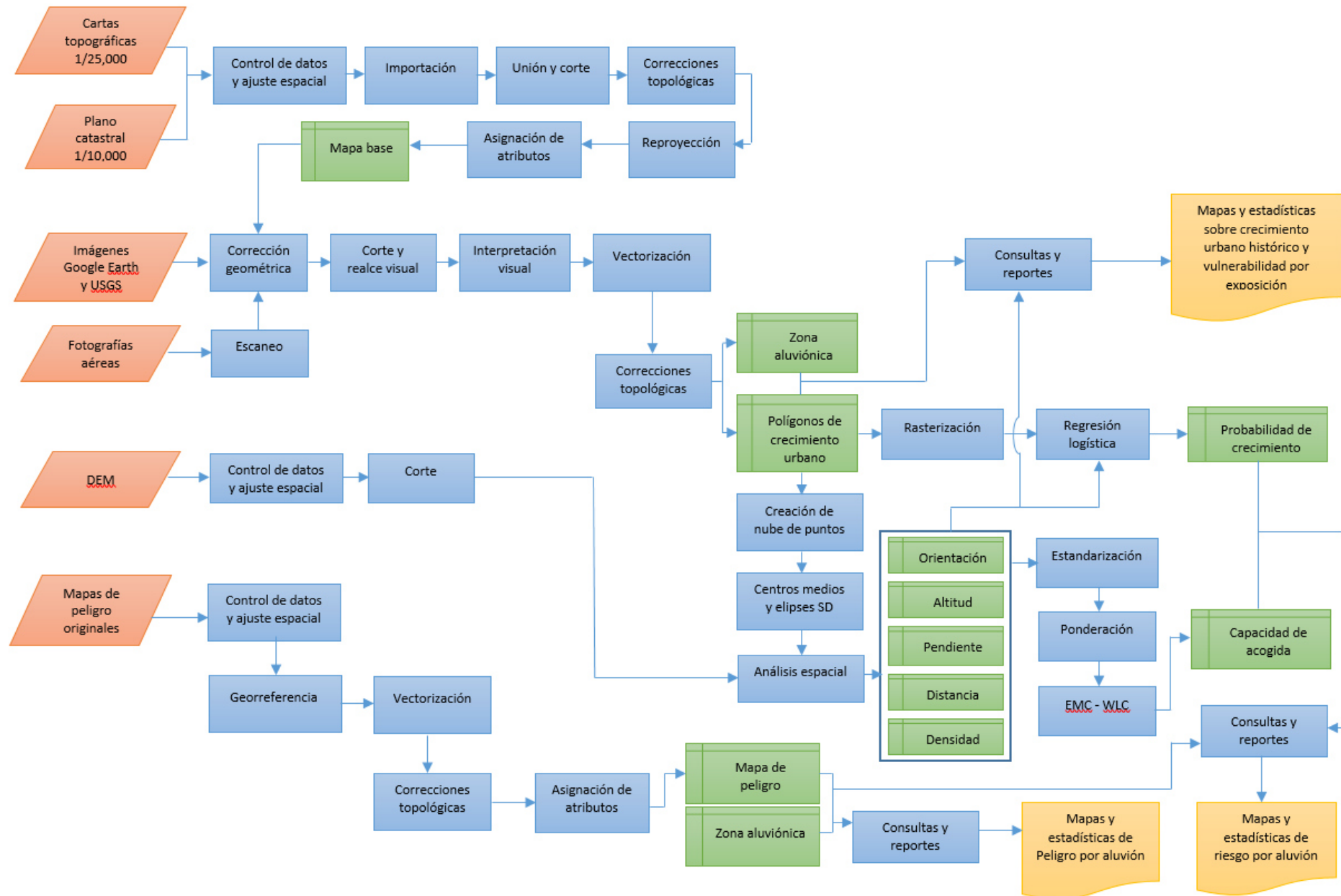


Figura 31. Diagrama de flujo del procesamiento y análisis de la información. Elaborado por el autor.

CAPITULO 4: ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Crecimiento de la ciudad de Huaraz a partir del aluvión de 1941

4.1.1. Procesamiento de información de sensores remotos

El aluvión ocurrido el 13 de diciembre de 1941 y el terremoto del 31 de mayo de 1970 fueron, independientemente, dos fenómenos naturales críticos en el desarrollo actual de la ciudad de Huaraz, para evaluar espacialmente cómo evolucionó su crecimiento urbano es indispensable el uso de imágenes históricas y actuales con alta resolución espacial teniendo en consideración la escala de trabajo.

Luego de una búsqueda documentaria se obtuvieron las siguientes imágenes en orden cronológico:

Cuadro 8. Imágenes remotas empleadas

Descripción	Fuente	Fecha	Resolución /Escala
Fotografía aérea 2524-53	Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas – ANA, capturada por el Instituto Geográfico Militar	15-8-1948	1/30,000
Fotografía aérea 2524-91	Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas – ANA, capturada por el Instituto Geográfico Militar	15-8-1948	1/30,000
Fotografía aérea 14241	IGN capturada por USAF	15-6-1962	1/40,000

Fotografía satelital DZB1213-500232L005001	USGS EROS capturada por el Sistema Satelital Keyhole (KH)	04-10-1977	20 a 30 pies
Fotografía aérea 2C-10A-53	Barrick - Mina Pierina	17-07-2001	1/25,000
Fotografía satelital	Google Earth	10-2003	1 metro
Fotografía satelital	Google Earth	08-2018	1 metro

Fuente. Elaborado por el autor

Las imágenes comprenden un período total de 70 años entre 1948 y 2018. Las fotografías aéreas 2524-53 y 2524-91 se emplearon para crear la Escena 1948, la fotografía aérea 2C-10A-53 se complementó con una imagen obtenida de Google Earth del año 2003 para completar información del sector este y norte de la ciudad formándola Escena 2001. A fin de contar con información geomática multitemporal sensible a los cambios en el área urbana de la ciudad de Huaraz, se buscó una separación considerable entre las imágenes.

Cuadro 9. Período entre imágenes

Escenas	Período
Escena 1948	14 años
Escena 1962	
Escena 1962	15 años
Escena 1977	
Escena 1977	24 años
Escena 2001	
Escena 2001	17 años
Escena 2018	

Fuente. Elaborado por el autor

En general se trata de imágenes pancromáticas de diversa fuente con la mejor resolución espacial disponible, las que fueron obtenidas en formato impreso y digital con una resolución de escaneo de 600 dpi, sobre éstas últimas se efectuaron las correcciones geométricas.

Del análisis de las cinco imágenes y del Plano Básico del Catastro Urbano de la ciudad, se definió una zona de análisis correspondiente a un rectángulo de 5312.8 m por 4815.4 m con un área de 25.583 km² entre las coordenadas 220169.2N-8948596.8E (vértice Noroeste) y 225482.0N-8943781.4E (vértice Sudeste). Se definió esta zona de análisis por que comprende completamente a la ciudad de Huaraz y sus principales zonas de expansión en el período de análisis. Por el Sur hasta las áreas pobladas del barrio de Río Seco, por el Norte hasta el barrio de Palmira y el río Casca, por el Este hasta los centros poblados de Cantu y Marián, y por el Oeste hasta el centro poblado de Mitucro.

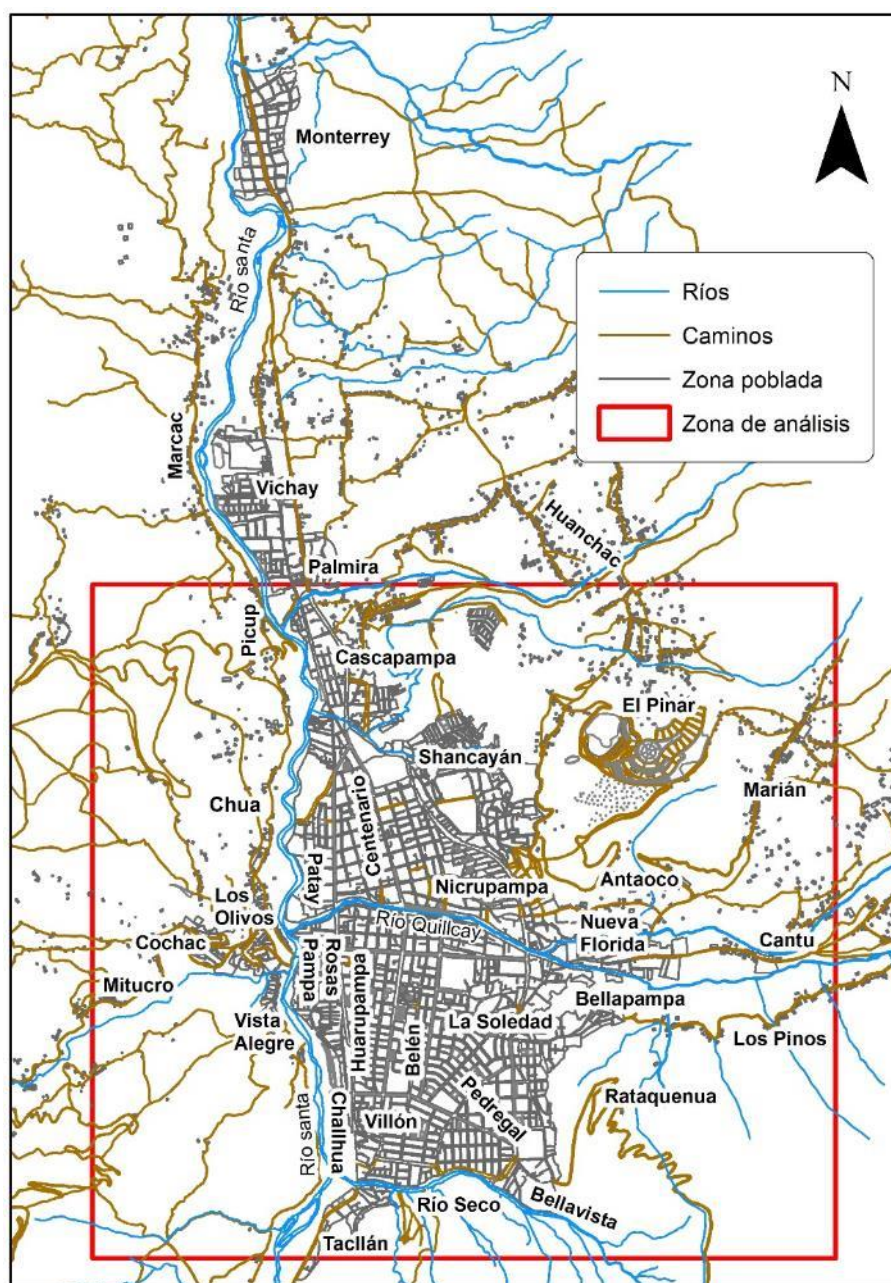


Figura 32. Ubicación de los principales sectores/barrios y centros poblados en la zona de análisis. Adaptado del Plano Básico de la ciudad de Huaraz

Escena del año 1948. Dada la necesidad de corregir geométricamente las imágenes de diversa fuente escala y antigüedad se hizo necesario efectuar una corrección de imagen a imagen. La imagen base seleccionada fue la del año 2018 la misma que fue contrastada con el mapa base proyectado al sistema WGS84.

Del análisis visual se pudo constatar el alto nivel de ajuste espacial para la escala 1/10,000 (escala del Plano Básico de la ciudad) estableciéndose 71 puntos de verificación en áreas claramente identificables entre la imagen y el Plano Básico obteniéndose un error medio cuadrático promedio de 2.3 metros.

El cálculo siguiente permite hallar el error medio cuadrático máximo permisible:

$$\text{RMSE permisible} = \frac{\text{Error aceptable en terreno}}{\text{Valor z de probabilidad de ocurrencia}}$$

$$\text{RMSE permisible} = \frac{\text{Error aceptable en terreno}}{1.64}$$

Para la escala 1/10,000 de Plano Básico, el error máximo en el mapa es 1/50 pulgadas.

$$\begin{array}{l} \text{Error aceptable} = \text{Error} * \text{Factor de} * \text{Factor de conversión} \\ \text{en terreno} \quad \text{en mapa} \quad \text{escala} \quad \text{de unidades} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Error aceptable} = 1/50 \text{ pulg.} * 10,000 * 0.0254 \text{ m/pulg.} \\ \text{en terreno} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Error aceptable} = 5.08 \text{ metros} \\ \text{en terreno} \end{array}$$

$$\text{RMSE permisible} = \frac{5.08 \text{ m}}{1.64}$$

$$\text{RMSE permisible} = 3.1 \text{ metros}$$

Por lo tanto, el error de 2.3 metros obtenido está por debajo de máximo permisible por lo que se acepta el uso de la imagen del año 2018 como base para la corrección de las demás imágenes.

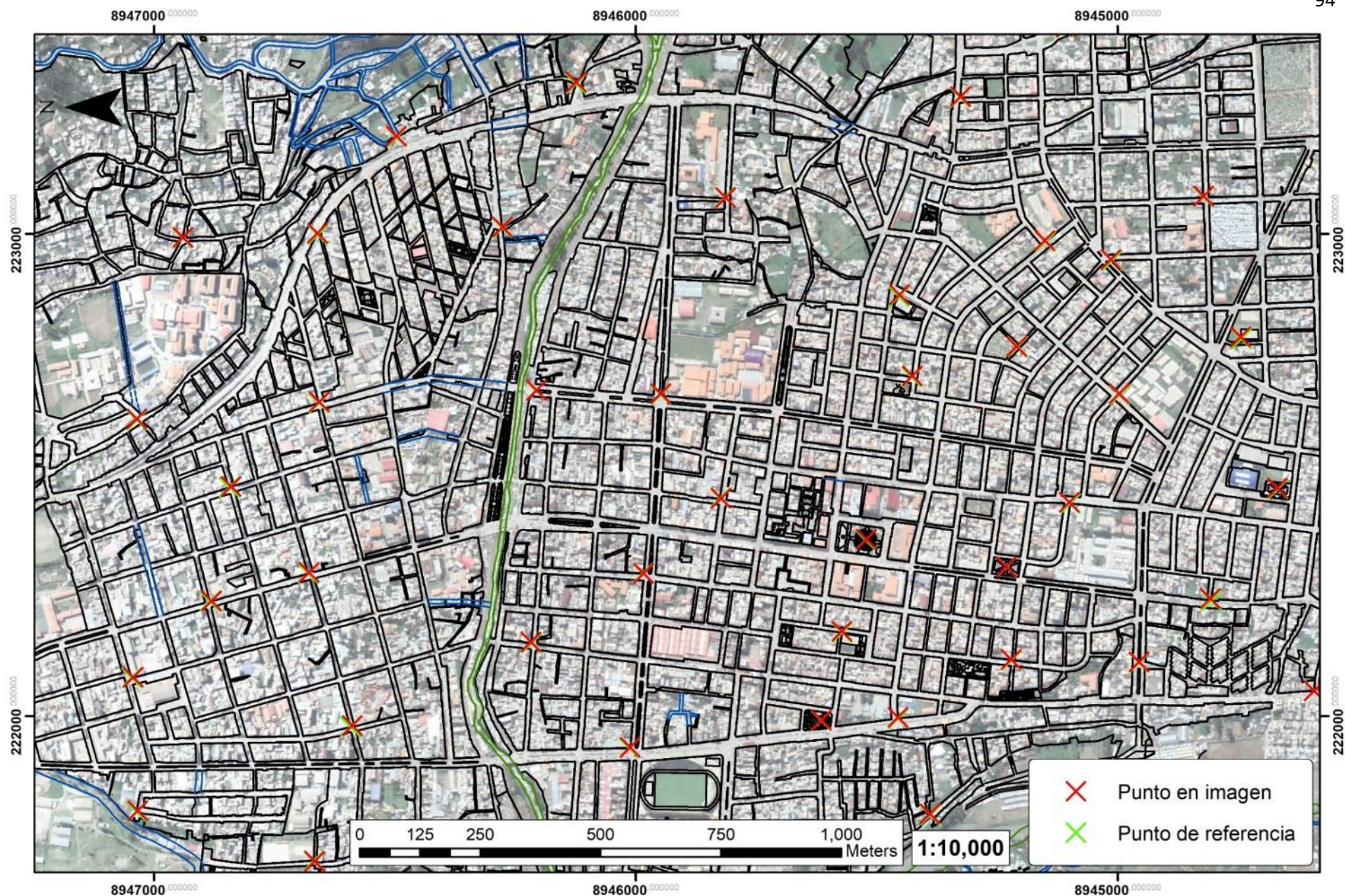


Figura 33. Distribución de puntos de verificación de coordenadas para la imagen base del año 2018. Elaborado por el autor.

Cuadro 10. Puntos de verificación de coordenadas para la imagen del año 2018 en base al Plano Básico Catastral de Huaraz

ID	LONGITUD IMG.	LATITUD IMG.	LONGITUD REF.	LATITUD REF.	ERROR X	ERROR Y	ERROR TOT.
1	221923.7	8944198.5	221922.3	8944195.5	1.4	3.1	3.4
2	222086.4	8944288.5	222085.5	8944289.6	1.0	-1.1	1.5
3	223213.5	8944488.3	223210.5	8944488.2	3.1	0.1	3.1
4	222450.5	8944451.5	222448.8	8944447.9	1.7	3.5	3.9
5	223032.3	8944319.7	223031.3	8944319.3	1.0	0.5	1.1
6	222807.8	8944482.8	222804.6	8944480.1	3.3	2.6	4.2
7	223494.5	8944335.6	223495.2	8944333.4	-0.6	2.2	2.3
8	223428.7	8945106.3	223428.0	8945108.7	0.6	-2.3	2.4
9	222946.1	8945014.3	222944.6	8945012.0	1.5	2.2	2.6
10	222785.7	8944745.2	222781.9	8944744.0	3.8	1.2	4.0
11	223077.8	8944822.2	223076.7	8944822.4	1.2	-0.3	1.2
12	222472.2	8944669.0	222470.6	8944667.4	1.6	1.5	2.2
13	222668.2	8944997.6	222665.7	8944996.4	2.5	1.1	2.8
14	222111.8	8944956.3	222110.3	8944955.9	1.5	0.4	1.6
15	222442.8	8945100.8	222440.6	8945098.6	2.3	2.2	3.2
16	222051.5	8944592.8	222051.9	8944591.7	-0.4	1.1	1.1
17	222242.8	8944807.9	222238.9	8944805.7	3.9	2.2	4.4
18	221996.7	8945456.4	221994.7	8945455.2	2.0	1.1	2.3
19	221796.5	8945389.9	221793.9	8945389.0	2.6	0.9	2.8
20	222116.6	8945221.4	222115.7	8945220.3	0.9	1.1	1.4
21	222175.3	8945573.1	222172.7	8945572.2	2.6	0.8	2.8
22	222365.8	8945522.3	222364.3	8945523.6	1.5	-1.4	2.1
23	222309.5	8945231.7	222309.3	8945231.2	0.2	0.5	0.5
24	222704.8	8945427.0	222702.6	8945428.0	2.2	-1.0	2.4
25	222765.9	8945210.3	222766.0	8945208.3	-0.2	2.0	2.0
26	222873.0	8945453.2	222869.3	8945454.8	3.7	-1.6	4.0
27	222985.7	8945151.6	222983.0	8945150.6	2.7	1.0	2.9
28	223284.2	8945326.2	223282.2	8945327.0	2.0	-0.8	2.2
29	223455.6	8945834.2	223453.7	8945834.5	1.9	-0.3	2.0
30	223596.1	8945377.0	223598.6	8945378.4	-2.5	-1.4	2.9
31	223806.5	8945912.0	223805.5	8945911.2	1.0	0.8	1.2
32	223639.8	8946782.9	223635.7	8946783.4	4.1	-0.4	4.1
33	224701.8	8946521.0	224700.4	8946523.5	1.4	-2.5	2.8
34	223013.5	8946277.3	223011.7	8946277.9	1.8	-0.6	1.9
35	223202.4	8946498.0	223200.3	8946497.0	2.1	1.0	2.3
36	222668.2	8945948.7	222666.1	8945948.8	2.1	-0.1	2.1
37	222450.7	8945824.1	222451.5	8945825.8	-0.8	-1.7	1.9
38	223074.6	8945814.6	223075.8	8945815.2	-1.2	-0.6	1.3
39	223314.3	8946124.1	223310.9	8946124.9	3.4	-0.7	3.5
40	221991.2	8945615.6	221990.5	8945615.8	0.7	-0.2	0.7

41	221934.1	8946012.5	221933.2	8946014.4	0.8	-1.9	2.0
42	221351.5	8946137.9	221353.2	8946138.5	-1.7	-0.6	1.8
43	222295.2	8945984.7	222296.1	8945985.5	-0.9	-0.8	1.2
44	221979.3	8946589.6	221976.8	8946592.9	2.5	-3.4	4.2
45	222153.1	8946218.1	222150.9	8946217.2	2.3	0.9	2.4
46	222079.8	8947044.2	222078.3	8947047.0	1.6	-2.8	3.2
47	222650.9	8946657.6	222648.6	8946658.2	2.3	-0.6	2.4
48	222297.3	8946678.9	222295.0	8946681.0	2.3	-2.0	3.0
49	221698.3	8946667.3	221700.0	8946668.8	-1.7	-1.5	2.3
50	221988.8	8947297.2	221987.4	8947301.1	1.4	-3.8	4.1
51	221803.1	8947034.6	221800.9	8947037.4	2.3	-2.8	3.6
52	222238.2	8946881.7	222237.4	8946884.5	0.8	-2.7	2.9
53	222616.2	8947036.5	222613.2	8947036.6	3.0	-0.1	3.0
54	222475.9	8946841.0	222473.8	8946844.4	2.1	-3.4	4.0
55	222992.2	8946940.6	222990.7	8946941.0	1.4	-0.4	1.5
56	224145.1	8947403.3	224145.1	8947403.6	0.0	-0.3	0.3
57	222684.6	8947338.7	222681.1	8947339.0	3.5	-0.3	3.5
58	222653.5	8947622.5	222650.3	8947623.0	3.2	-0.5	3.2
59	221240.0	8947995.9	221239.4	8947993.7	0.6	2.2	2.3
60	221795.6	8947928.2	221792.9	8947926.2	2.7	2.0	3.4
61	222047.5	8948060.5	222045.6	8948061.7	1.9	-1.2	2.2
62	222246.4	8947779.0	222245.8	8947779.2	0.6	-0.2	0.6
63	224053.0	8944517.3	224052.3	8944518.6	0.7	-1.3	1.5
64	222881.0	8948585.8	222879.9	8948584.4	1.1	1.4	1.7
65	223629.6	8947851.1	223627.2	8947850.6	2.5	0.5	2.5
66	224018.0	8948346.8	224017.0	8948346.9	1.0	-0.1	1.0
67	221649.6	8948495.6	221649.8	8948495.1	-0.2	0.5	0.6
68	223000.8	8946661.6	222997.8	8946661.2	3.1	0.4	3.1
69	222928.0	8947307.7	222926.9	8947308.6	1.1	-0.8	1.4
70	220990.2	8944560.1	220990.3	8944560.1	-0.1	0.0	0.1
71	220866.5	8945957.3	220866.9	8945956.6	-0.4	0.8	0.9
72	222675.2	8946206.6	222674.4	8946207.6	0.8	-1.0	1.3
						RMSE	2.3

Fuente. Elaborado por el autor

La Figura 33 muestra la distribución de los puntos de verificación notándose visualmente el correcto nivel de ajuste espacial; así como la lista de puntos y sus respectivos errores.

Adicionalmente, la mínima unidad cartografiable de 4mm² para cualquier escala corresponde, para la escala 1/10,000, a 400m²

(20m x 20m) resolución que todas las imágenes empleadas superan largamente.

Escena del año 2001. Compuesta por una fotografía aérea a colores del año 2001 complementada por dos imágenes (franjas) de Google Earth del año 2003. Sobre la fotografía aérea del año 2001 se aplicó una corrección geométrica spline de imagen a imagen con 352 puntos de control alcanzado un error RMSE de 0.004 m.

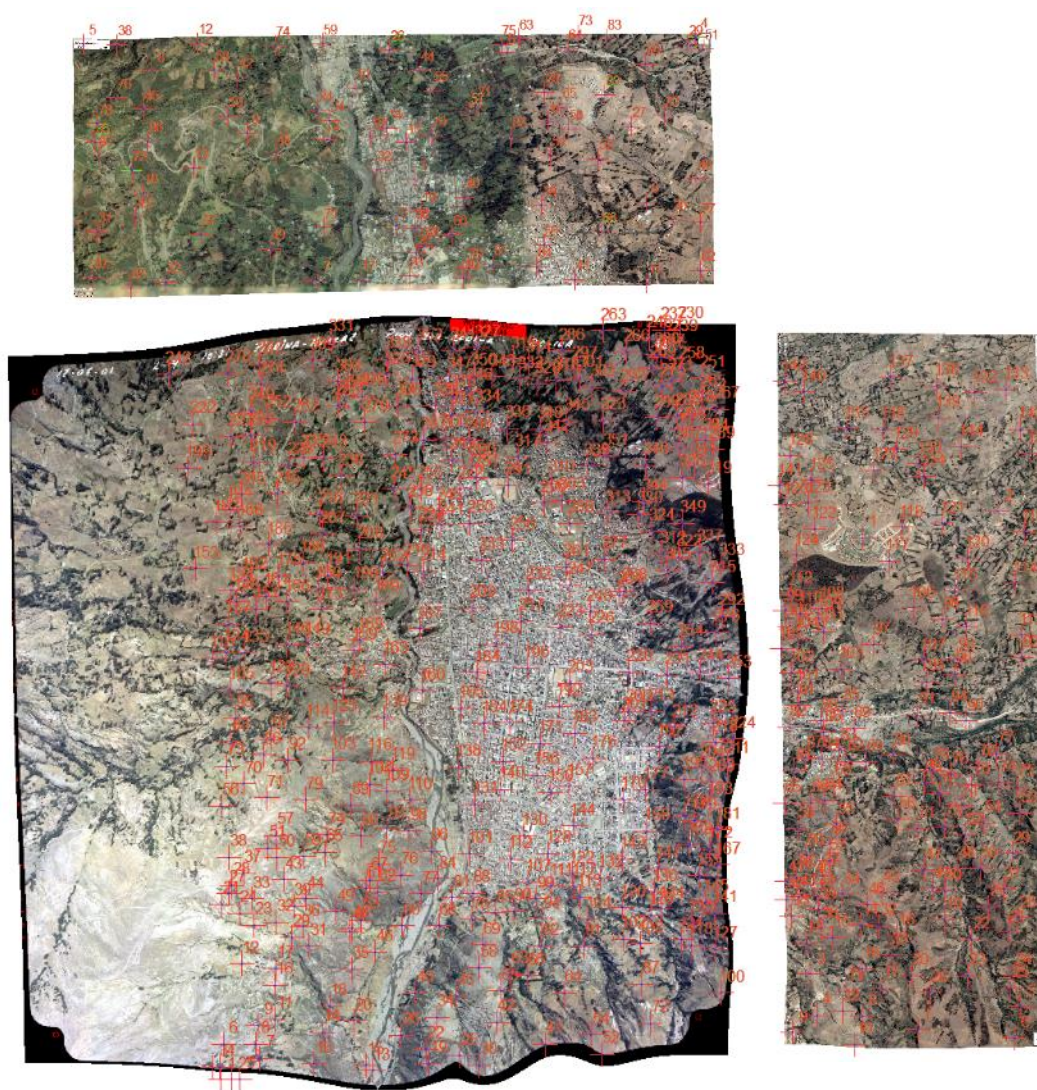


Figura 34. Imágenes de los años 2001-2003 y puntos de control empleados en la corrección geométrica. Elaborado por el autor.

Las imágenes complementarias de los sectores este y norte se corrigen del mismo modo con 144 y 87 puntos de control y errores RMSE de 0.0003 m y 0.481 m. respectivamente. Se aplicaron sobre las imágenes procedimientos superposición y balance de colores para la obtención del mosaico final la que fue analizada visualmente respecto a la imagen de referencia del año 2018 aceptándose su nivel de ajuste y cortándose la zona de análisis.

Escena del año 1977. La imagen fue recortada inicialmente debido a que cubre un área mucho mayor (147x151km) a la zona de análisis. La imagen resultante fue corregida geométricamente empleando una transformación de tipo spline con 333 puntos de control con un error RMSE de 0.967 m. Se efectuó un análisis visual para evaluar la precisión del ajuste en comparación con las escenas del 2018 y 2001, cortándose finalmente la imagen a la zona de análisis.

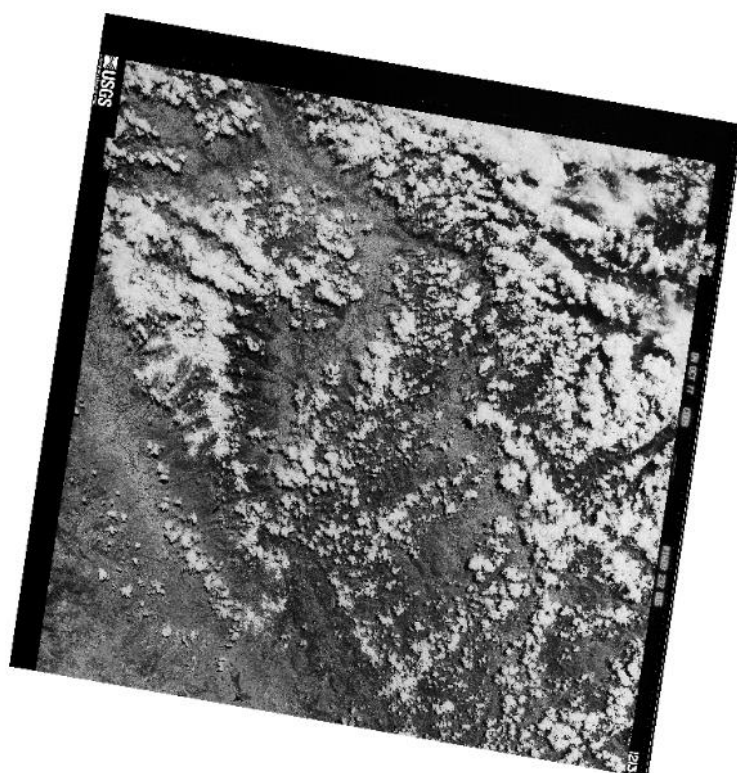


Figura 35. Imagen DZB1213-500232L005001_a del año 1977. Obtenida de USGS EROS mediante Earth Explorer.

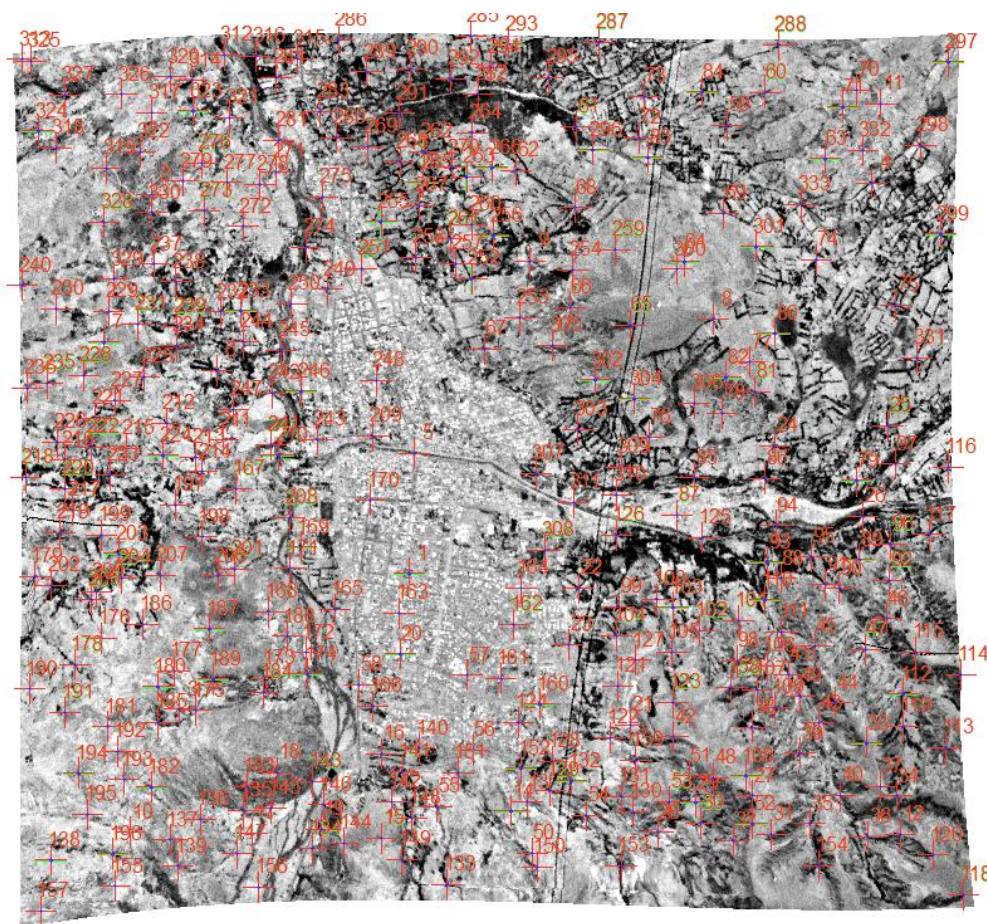


Figura 36. Imagen del año 1977 y puntos de control empleados en la corrección geométrica. Elaborado por el autor.

Escena del año 1962. La imagen fue corregida geométricamente empleando 607 puntos de control, llegando a un error RMSE de 0.035 m. Fue necesario un mayor número de puntos de control debido a la escala de la fotografía y al nivel de desplazamiento observado debido al relieve. El nivel de ajuste espacial de la imagen fue analizado dándose por aceptado efectuándose el corte a la zona de análisis.

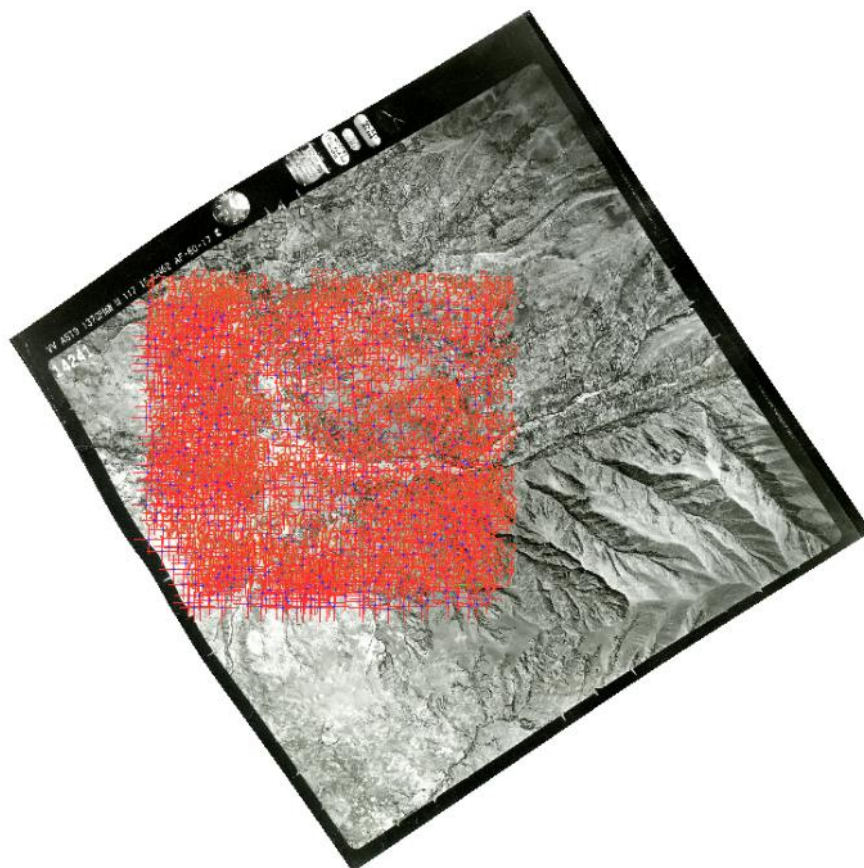


Figura 37. Fotografía aérea de 1962 completa y la zona de análisis procesada. Obtenida de IGN.

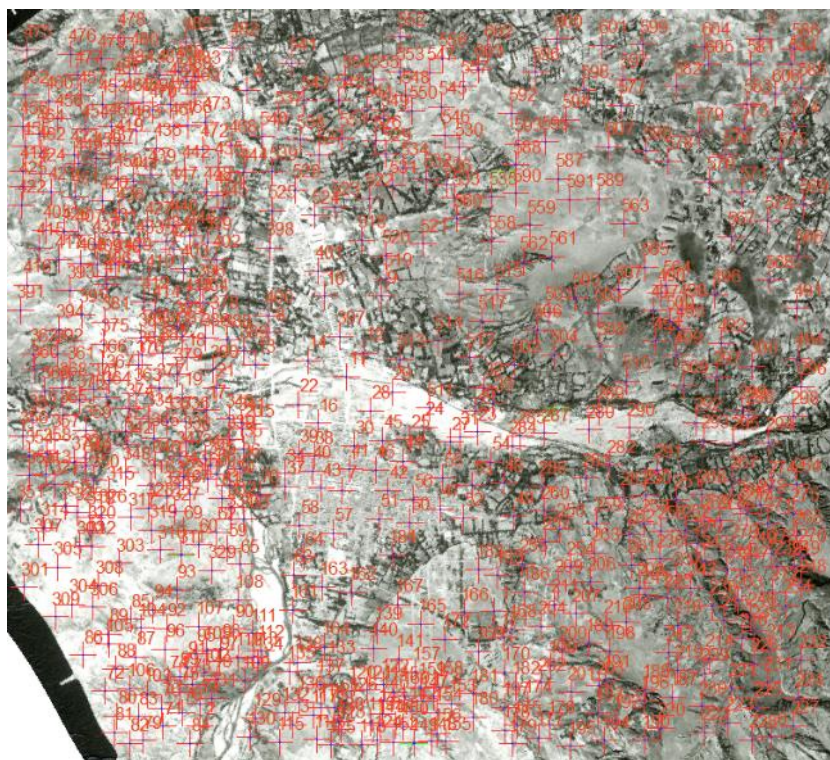


Figura 38. Detalle de los puntos de control para la corrección geométrica en la zona de análisis. Elaborado por el autor.

Escena del año 1948. Se emplearon dos fotografías aéreas del año 1948 a fin de lograr una mejor cobertura de la zona de análisis. Para corregir geométricamente la fotografía 2524-53 se emplearon 213 puntos de control y para la fotografía 2524-91, 438 puntos de control. En ambos casos se aplicó una corrección de tipo spline llegando a un error RMSE inferior a 0.001 m. Posteriormente se analizó visualmente y aceptó el ajuste espacial en relación a las escenas de los años anteriores procediéndose a efectuar los cortes y ajuste de colores para obtener el mosaico final.

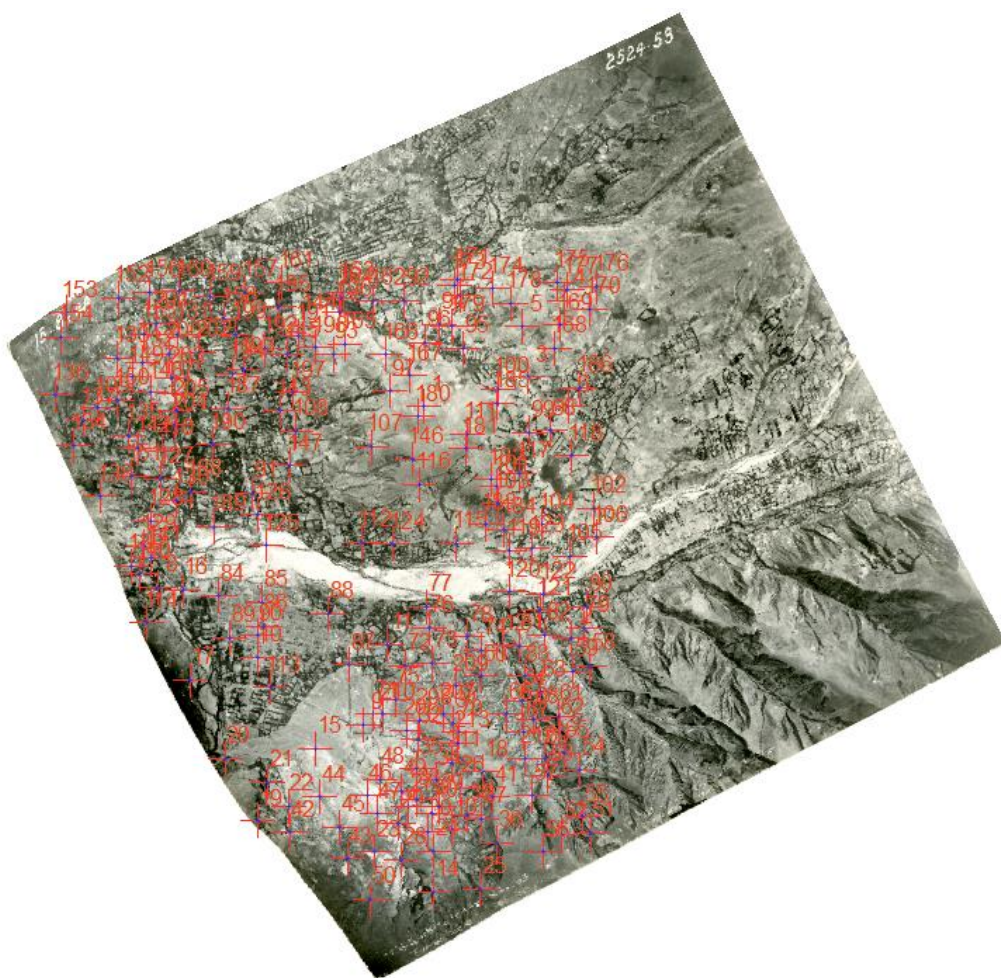


Figura 39. Fotografía aérea 2524-53 de 1948 y puntos de control para la corrección geométrica en la zona de análisis. Obtenida de la ANA-UGRH

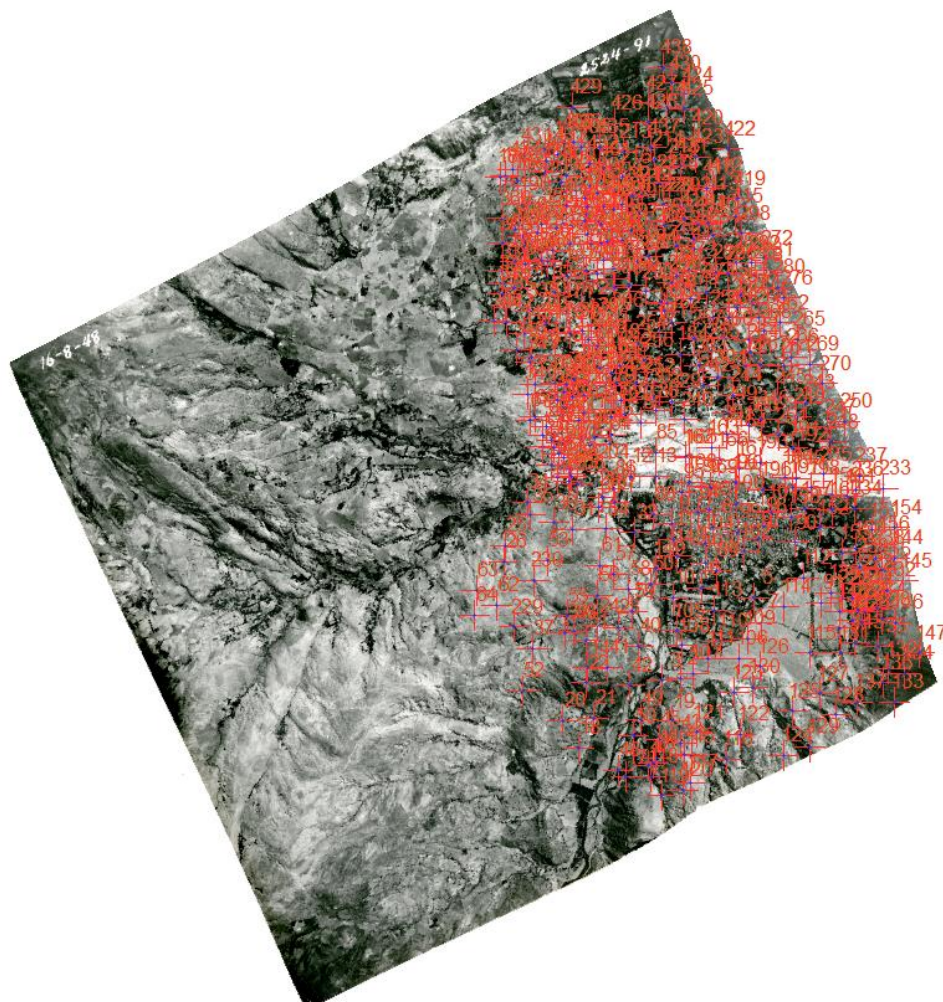


Figura 40. Fotografía aérea 2524-91 de 1948 y puntos de control para la corrección geométrica en la zona de análisis. Obtenida de la ANA-UGRH

Se obtienen las cinco escenas corregidas geométricamente y recortadas a la zona de análisis para proceder a analizar y restituir el crecimiento urbano de la ciudad de Huaraz.

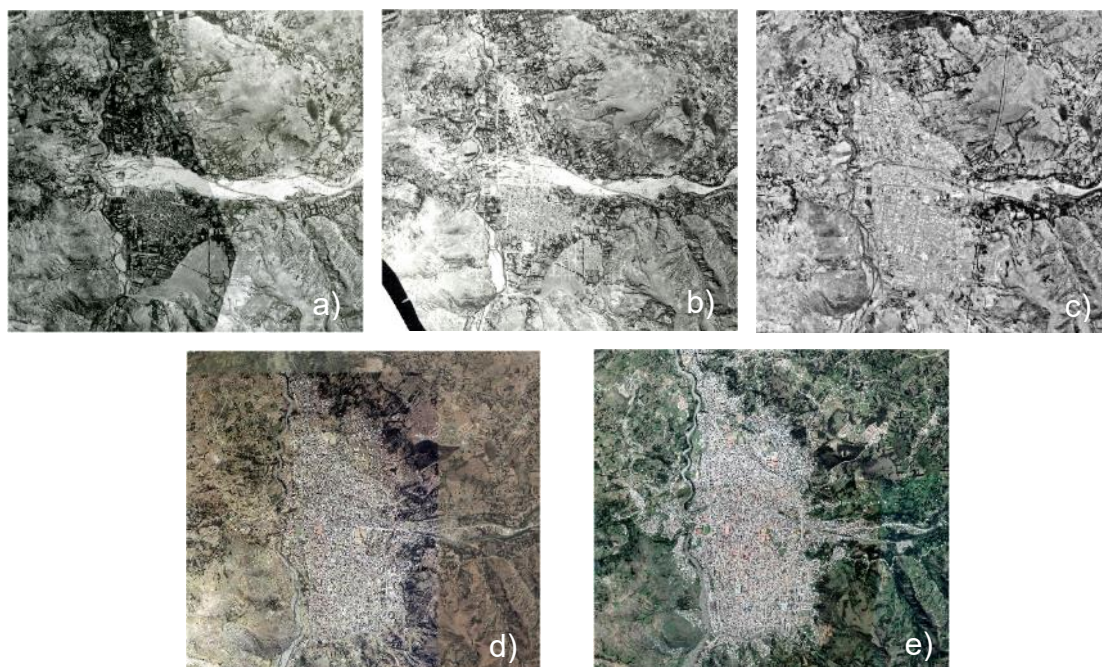


Figura 41. Escenas corregidas geométricamente correspondientes a los años a) 1948, b) 1962, c) 1977, d) 2001 y e) 2018. Elaborado por el autor.

4.1.2. Evolución y tendencia de crecimiento de la ciudad de Huaraz

Posteriormente al aluvión ocurrido el 13 de diciembre de 1941, la ciudad de Huaraz experimentó un acelerado crecimiento urbano. El año 1948 la zona urbana/poblada de Huaraz y área periférica tenía un área de 111 ha el 86% ubicado al Sur del río Quillcay en el distrito de Huaraz constituyendo el núcleo histórico de la ciudad. El 14% restante se ubicó al Norte del río Quillcay en el actual distrito de Independencia como parte del recientemente creado barrio de Centenario. En general, las áreas aledañas a la zona aluviónica y el núcleo histórico de la ciudad estaban conformadas por grandes construcciones de adobe de más de un piso con patios interiores, concentradas y con calles angostas. En el barrio de Centenario predominan las áreas agrícolas y forestales, las edificaciones son de adobe dispersas a lo largo de la Av. Centenario y la actual Av. Confraternidad Internacional Oeste.



Figura 42. a) Detalle aéreo de las edificaciones el año 1948, b) Construcciones de adobe y puente del río Quillcay en 1939.
 Obtenido de Asociación WARAS
<http://www.pcca.org.pe/fototeca/show/10>

Para el año 1962 el área urbana/poblada de la ciudad de Huaraz y zonas periféricas experimentó un crecimiento moderado de 47 ha (42%) con respecto a 1948 totalizando 158 ha, el 76% ubicado en el sector Sur del río Quillcay en el actual distrito de Huaraz y el 24% en el barrio de Centenario, actual distrito de Independencia. Se evidencia un mayor crecimiento en el sector norte del río Quillcay en el barro de Centenario donde las áreas agrícolas y forestales son paulatinamente reemplazadas por infraestructura urbana, también es notorio el crecimiento urbano en barrio de Pedregal en zonas aledañas al cementerio de Huaraz. En las zonas urbano marginales y rurales aledañas a la ciudad se puede apreciar también la aparición de áreas pobladas dispersas casi inexistentes en 1948. La zona aluviónica estaba prácticamente despoblada.

El crecimiento urbano hasta 1962 no fue acompañado de la modernización de la infraestructura urbana, en el núcleo histórico de la ciudad las edificaciones son grandes, concentradas, de adobe con más de un piso y calles estrechas. En las áreas recientemente ocupadas por infraestructura urbana se evidencia un crecimiento desordenado, esto sucedió en las nuevas zonas urbanas del barrio de Centenario y la zona.

La escena del año 1977 muestra un cambio severo con respecto a los años 1948 y 1962. El área urbana/poblada total es de 340 ha, 182 ha más que en 1962 (115%) y 229 ha más que en 1948 (206%). El 38% del área urbana/poblada en 1977 se ubica en el distrito de independencia al Norte del río Quillcay, mayoritariamente en el barrio de Centenario y otros nuevos emergentes, y en menor proporción en la zona urbano marginal y rural. Las áreas agrícolas y forestales del barrio de Centenario fueron casi completamente reemplazadas por infraestructura urbana reciente, sin embargo, persisten las edificaciones mayoritariamente de adobe, concentradas, pero con una distribución desordenada. Al norte del río Quillcay se desarrollan los nuevos barrios de Nicrupampa, Cascapampa, Palmira, El Milagro, etc.

El 62% del área urbana/poblada de la ciudad en 1977 se ubica al Sur del río Quillcay, en la que se evidencia un crecimiento urbano importante en el barrio de Pedregal en el extremo Sureste de la ciudad, donde la infraestructura urbana ha conectado el cementerio con el núcleo histórico de la ciudad. Se desarrolla el barrio de Villón, crecen los barrios de Huarupampa, Belén y La Soledad.

La explicación para este explosivo crecimiento del área urbana en la ciudad de Huaraz radica en el terremoto del 31 de mayo de 1970 que destruyó casi en su totalidad el núcleo histórico de la ciudad, toda esta área afectada fue despejada para dar inicio al proceso de reconstrucción viéndose obligada la población a desplazarse hacia el norte de la ciudad o aún más al sur, lugares donde se establecieron campamentos temporales después del terremoto los que posteriormente se constituyeron en nuevas áreas urbanas.



Figura 43. Áreas de campamento para acoger a la población desplazada por el terremoto de 1970 a) Nicrupampa b) Villón.
Fotografía aérea del 02-julio-1970 facilitada por S. Wegner.

Para el año 2001 el área urbana o poblada de la ciudad de Huaraz asciende a 589 ha observándose el mayor incremento en el periodo de estudio, con respecto a 1977 el incremento es de 249 ha es decir un 77% del área con infraestructura urbana aquel año y el 430% con respecto al área en 1948.

El 45% del área con cobertura urbana o poblada el año 2001 se ubica en el distrito de Independencia en diversos barrios surgidos a partir de la década de 1970, merece énfasis el desarrollo del área urbano marginal y rural en el distrito de Independencia pues se desarrollan densamente barrios como Shancayán, Los Olivos, Nueva Florida, Patay y Quinuacocha; así como la zona residencial El Pinar y la proliferación de áreas pobladas dispersas en la zona rural. Las antiguas áreas agrícolas y forestales han sido reemplazadas en su totalidad por infraestructura urbana. Las nuevas zonas urbanas en el distrito de independencia están conformadas por edificaciones de material precario, adobe y material noble concentradas, pero con una distribución desordenada, organizada en manzanas con vías de comunicación amplias asfaltadas o pavimentadas. Barrios como Shancayan, Nueva Florida y Los Olivos muestran condiciones de ocupación precaria y hacinamiento.

El 55% del área urbana/poblada de la ciudad de Huaraz el 2001 de ubica en el distrito de Huaraz al Sur del río Quillcay. El núcleo

histórico reconstruido luego del terremoto constituye la zona más moderna y comercial de la ciudad con edificaciones de material noble de varios pisos, amplias vías asfaltadas o pavimentadas y todos los servicios urbanos propios de una ciudad moderna. Los barrios residenciales históricos como Belén, Huarupampa y La Soledad muestran edificaciones de material noble con equipamiento urbano moderno, sin embargo, en barrios emergentes como Villón, Pedregal, Challhua, Taclán y Río Seco se evidencian graves condiciones de ocupación precaria, sistemas constructivos deficientes y altamente vulnerables, hacinamiento y falta de servicios urbanos básicos.

El año 2018 el crecimiento del área urbana/poblada en la ciudad de Huaraz y periferia continúa, alcanzando 775 ha con un incremento de 186 ha con respecto al año 2001 es decir el 32% con respecto a este año y el 598% con respecto al año 1948. A diferencia de los años anteriormente evaluados, para el 2018 el mayor porcentaje de cobertura urbana se encuentra en el distrito de independencia (52%), resulta evidente durante todo el período evaluado que el sector ubicado al Norte de río Quillcay fue el de mayor crecimiento urbano.

El incremento de la cobertura urbana en el distrito de Independencia el año 2018 se debe sobre todo al desarrollo de los barrios de Shancayan al Noreste de la ciudad, Los Olivos y Cochac a Oeste, y Nueva Florida al Este. Destaca el crecimiento de los núcleos poblados dispersos al Noroeste de la ciudad en la zona rural en sectores como Marian y Huanchac, sin embargo, este crecimiento es desordenado y altamente disperso, paulatinamente estos sectores mayoritariamente de vocación agropecuaria y forestal van siendo ocupados por infraestructura urbana.

El 48% del área urbana/poblada en la ciudad de Huaraz el 2018 se ubica en el distrito capital, constituye el área con menor crecimiento en comparación al distrito de Independencia, sin embargo, el extremo Sur y Oeste de esta parte de la ciudad experimentó un importante pero caótico y precario crecimiento en los barrios de Challhua, Río Seco y Tacllán, ocupando inclusive el cauce del río Santa.

Cuadro 11. Evolución del área urbana/poblada en la ciudad de Huaraz en la zona de análisis.

AÑO	AREA TOTAL (ha)	INCREMENTO	
		ha	%
AÑO 1948	111.0		
AÑO 1962	157.9	46.9	42.2%
AÑO 1977	339.5	181.6	115.0%
AÑO 2001	588.5	249.0	73.3%
AÑO 2018	774.7	186.2	31.6%

Fuente. Elaborado por el autor

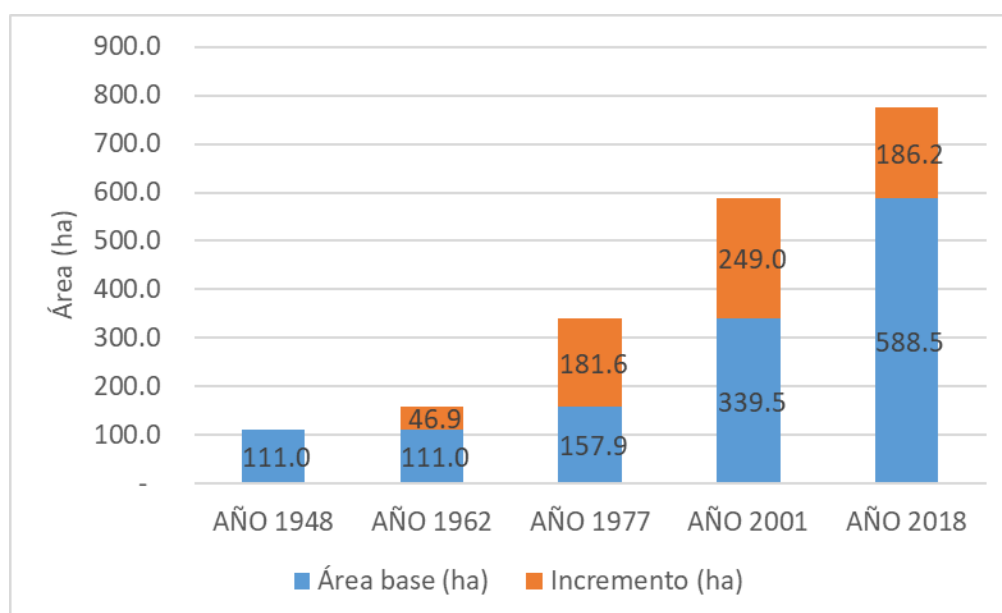


Figura 44. Evolución del área urbana/poblada en la ciudad de Huaraz en la zona de análisis. Elaborado por el autor.

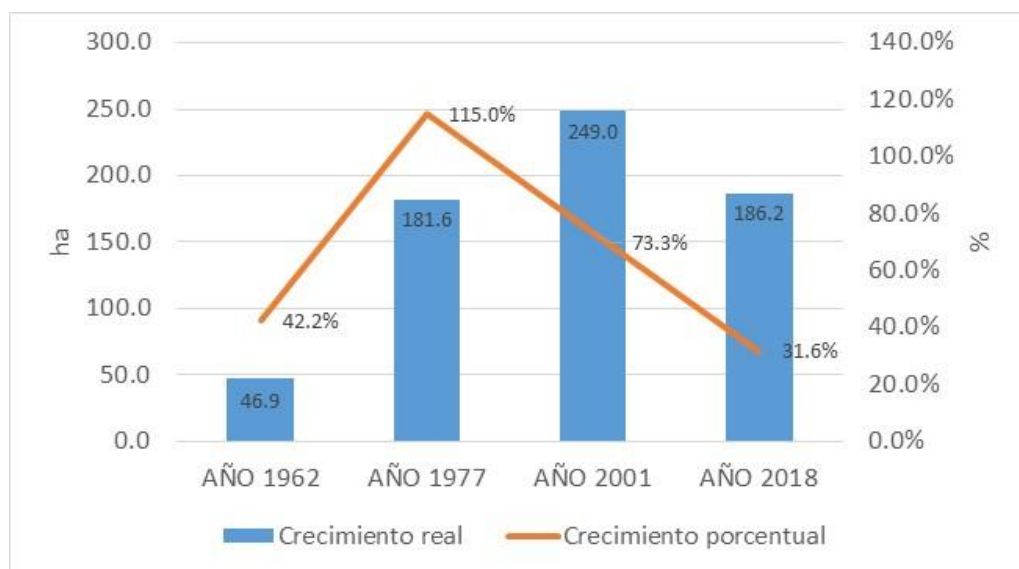


Figura 45. Crecimiento real y porcentual de la zona urbana/poblada de la ciudad de Huaraz en la zona de análisis. Elaborado por el autor.

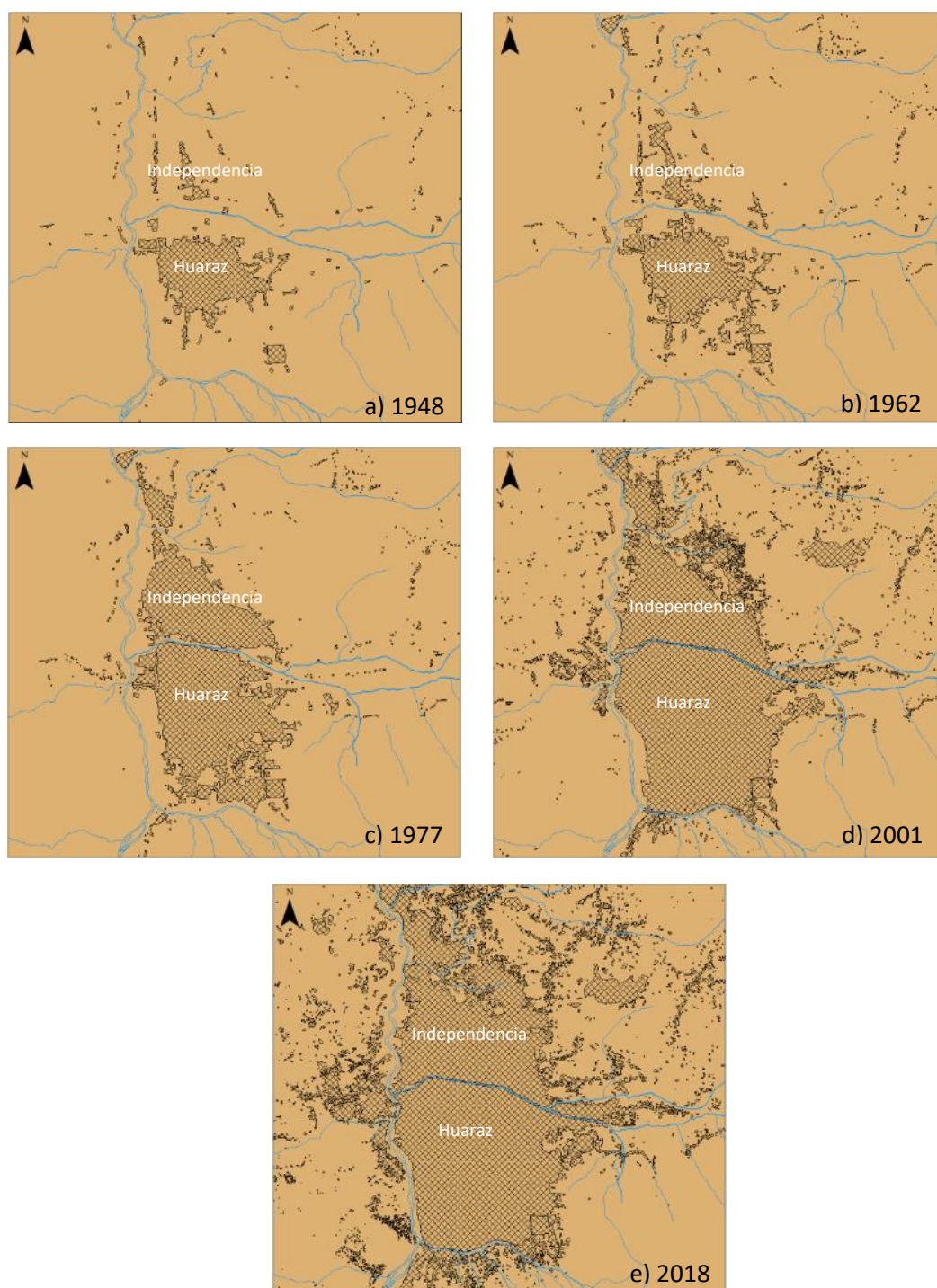


Figura 46. Evolución del área urbana/poblada de la ciudad de Huaraz en la zona de análisis entre 1948 y 2018. Elaborado por el autor.

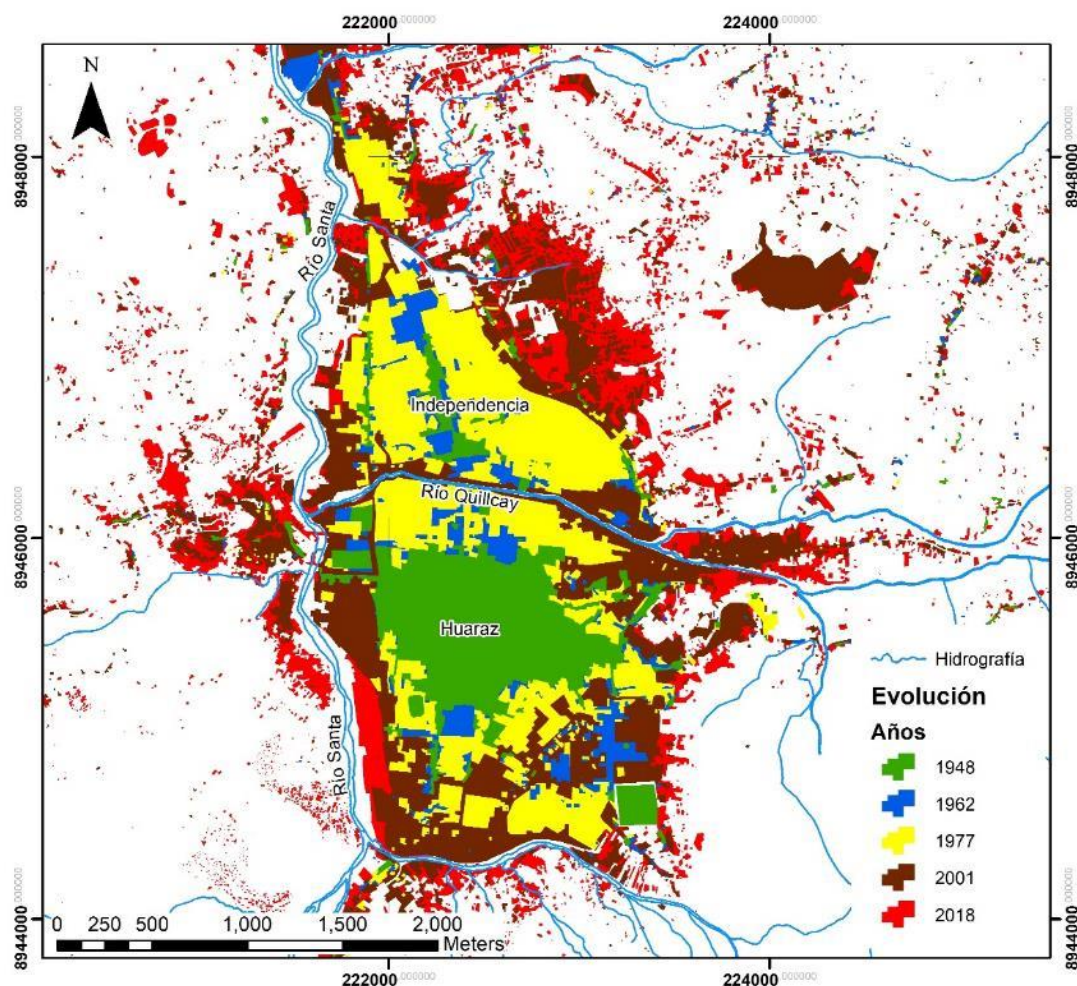


Figura 47. Evolución visual comparativa del área urbana/poblada de la ciudad de Huaraz en la zona de análisis entre 1948 y 2018. Elaborado por el autor.



Figura 48. Vistas de la moderna ciudad de Huaraz el año 2018 a) Núcleo histórico b) Zona aluviónica. Fotografías tomadas por el autor.

En base a los polígonos obtenidos para cada uno de los años evaluados, considerando un área mínima de 5 m² y con una separación de 2.24 m, se generó una nube de puntos aleatorios para cada año con el objetivo de analizar espacialmente la evolución del crecimiento de la ciudad de Huaraz.

Cuadro 12. Número de puntos aleatorios generados para cada año de análisis.

AÑO	NÚMERO DE PUNTOS
1948	41,280
1962	58,548
1977	124,195
2001	213,730
2018	281,290

Fuente. Elaborado por el autor

Se obtuvieron los siguientes centros medios para cada año:

Cuadro 13. Evolución anual de los centros medios.

Año	UTM "X"	UTM "Y"	Desplazamiento (m)	Dirección
1948	222538.5	8945683.8	-----	
1962	222543.9	8945826.9	143.2	Norte
1977	222522.2	8945981.1	155.7	Norte
2001	222593.8	8946051.4	100.4	Noreste
2018	222591.8	8946155.2	103.8	Norte
Global	222558.0	8945939.7	-----	

Fuente. Elaborado por el autor

Para el año 1948 el centro medio de las zonas urbanas/pobladas se ubicaba cerca a la actual plaza de armas, en el núcleo histórico de la ciudad, en los años siguientes evaluados la evolución ha sido notoria hacia el Norte en los años 1962 y 1977 con desplazamientos de 143 m y 156 m respectivamente.

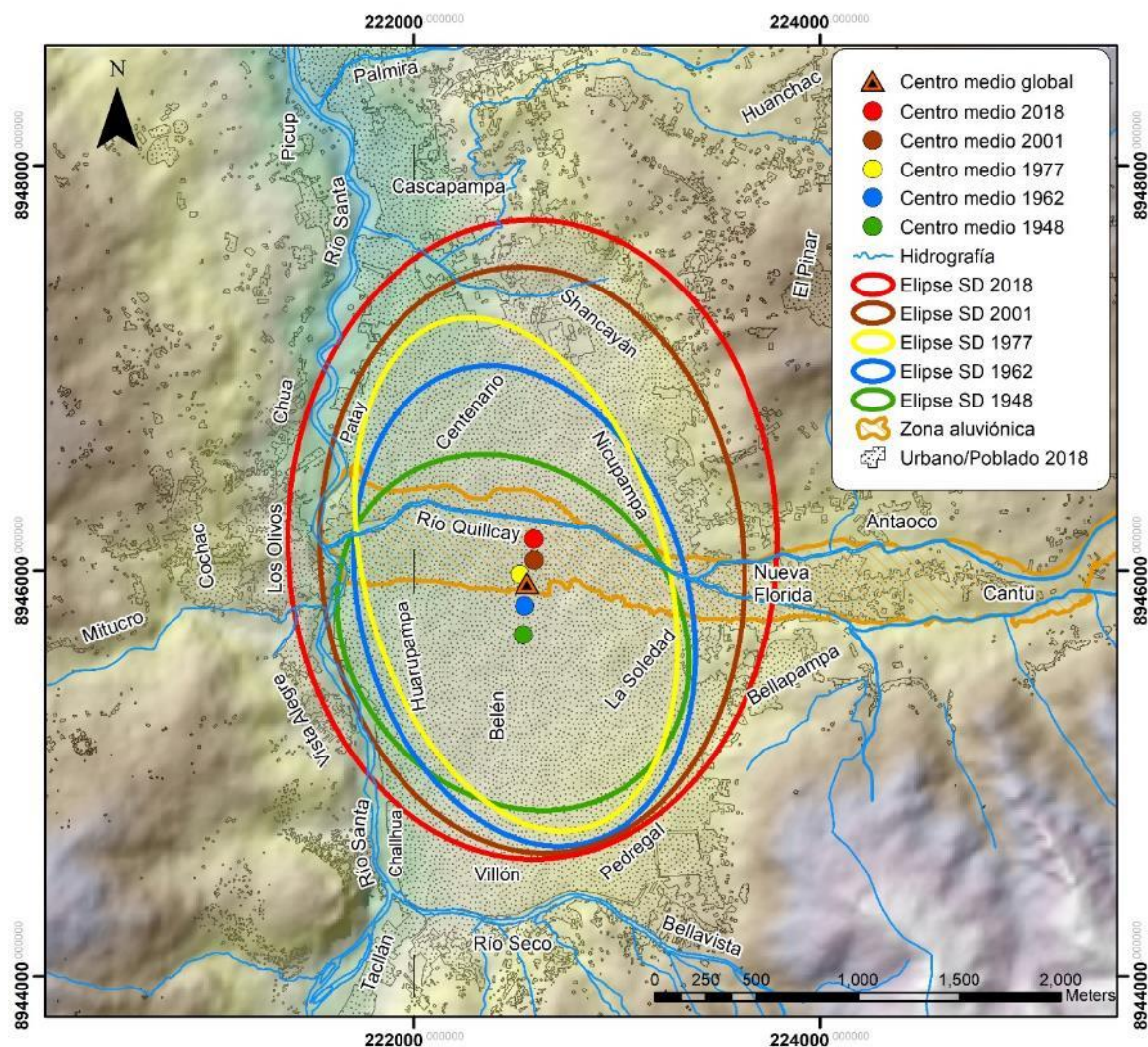


Figura 49. Evolución estadística espacial del crecimiento de la ciudad de Huaraz mediante centros medios y elipses de desviación estándar. Elaborado por el autor.

Para el año 2001 el centro medio de la zona urbana o poblada de la ciudad de Huaraz experimentó un desplazamiento de 100 m hacia el Noreste para mantener una dirección Norte de desplazamiento el año 2018 (con respecto al 2001) pero Noreste con respecto al año 1948. Para todo el período de estudio el centro medio se ha desplazado un total de 474 m con (471 m al Norte y 53 m al Este) con un ángulo de 6.5° con respecto al Norte, es decir la evolución histórica del crecimiento de la ciudad entre 1948 y 2018 ha sido hacia el Norte con una ligera tendencia hacia el Este. En base a los cinco centros medios se calculó el centro medio global correspondiente a todo el período de estudio, este punto es considerado el centro medio del

crecimiento de la ciudad de Huaraz correspondiente a la zona de análisis y es importante pues a partir de este punto se analizarán posteriormente la evolución de la dirección de crecimiento de la ciudad.

El análisis de los centros medios se refuerza observando la evolución de las elipses de desviación estándar para cada año evaluado.

Cuadro 14. Evolución anual de las elipses de desviación estándar.

Año	Centro X	Centro Y	Distancia estándar X	Distancia estándar Y	Rotación
1948	222487.3	8945695.1	796.0	944.4	137.2
1962	222543.9	8945826.9	809.7	1208.9	165.0
1977	222502.5	8945982.2	744.2	1297.8	164.6
2001	222581.6	8946052.8	1042.9	1449.1	174.9
2018	222584.0	8946154.4	1206.0	1578.1	179.3

Fuente. Elaborado por el autor

Claramente, la elipse correspondiente al año 1948 es la de menor tamaño (menores distancias estándar en X e Y) hecho que evidentemente corresponde a la menor área urbana existente ese año, la rotación de la elipse muestra que la ciudad se distribuía ligeramente hacia el Noroeste ocupando el sector Sur del río Quillcay, en el núcleo histórico de la ciudad. Para el año 1962 la elipse muestra un leve cambio en X (Este-Oeste) y un mayor cambio en Y (Norte-Sur), es decir, la ciudad crece y se distribuye en mayor proporción hacia el Norte y en menor magnitud hacia el Sur, manteniendo una ligera orientación hacia el Oeste. En 1977 la ciudad crece distribuyéndose hacia el Noroeste, la variación en el eje X (Este-Oeste) es baja.

Hasta este punto la evolución de la forma y rotación de las elipses es coherente con el mayor crecimiento observado en los nuevos barrios de distrito de Independencia como Centenario y

Nicrupampa con posterioridad al terremoto de 1970, y en menor medida hacia el sur en el distrito de Huaraz en los barrios de Villón y Pedregal. La evolución en el eje Y (Este-Oeste) es reducida.

La elipse correspondiente al año 2001 muestra un importante incremento de la distancia estándar en el eje Y (Este-Oeste) explicado por el crecimiento de los barrios al Oeste de Huaraz como Los Olivos y a Este como Nueva Florida en la zona aluviónica. Persiste también el crecimiento de la distancia estándar hacia el Norte indicador de la distribución de la ciudad para este año, sin embargo, la rotación muestra una reducción en la tendencia al Oeste de años anteriores pudiendo afirmarse que a partir del 2001 la orientación de la distribución de la ciudad cambió hacia el Este en comparación a los años 1948, 1962 y 1977.

El año 2018 el escenario es similar al año 2001 en lo referido a la rotación de la elipse, la ciudad se distribuye con orientación Norte y crece en esta dirección, pero también se puede evidenciar un importante incremento en la distancia estándar X (Este-Oeste) evidenciando un crecimiento del área urbana en esta dirección ocasionada por el permanente crecimiento de los barrios urbano marginales de Los Olivos y Nueva Florida en plena zona aluviónica.

Del análisis de los centros medios y elipses de desviación estándar se observa consistentemente que en el período de estudio la ciudad evolucionó en dirección Norte inicialmente con una leve orientación hacia el Oeste en los años 1948, 1962 y 1977 para posteriormente reducir su tendencia al Oeste entre los años 2001 y 2018, es decir, en todo el período de análisis los cambios en la distribución de la ciudad muestran una tendencia hacia el Noreste.

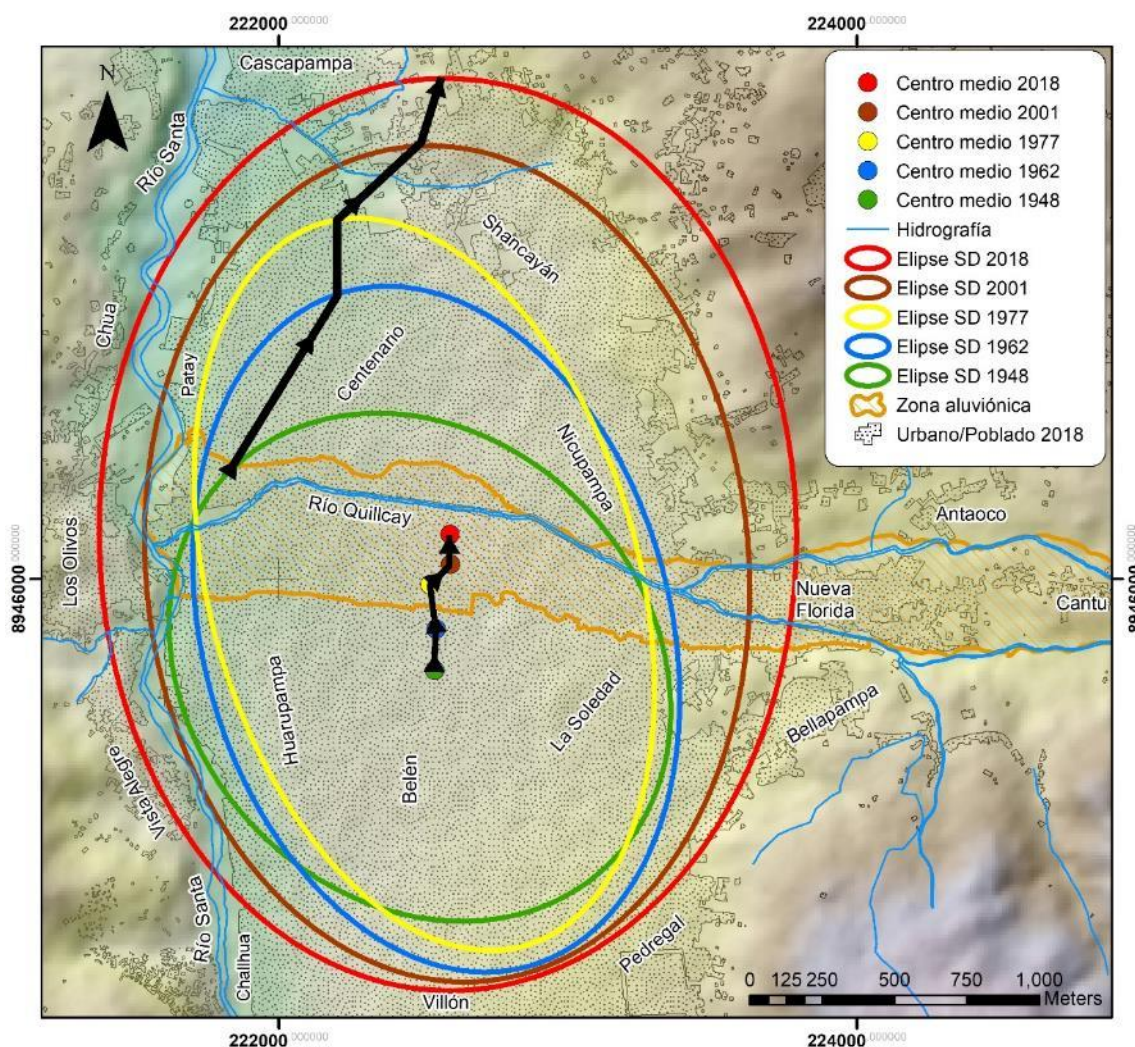


Figura 50. Detalle de la tendencia en la evolución del área urbana/poblada de la ciudad de Huaraz en la zona de análisis. Elaborado por el autor.

Es necesario, en esta instancia, conociendo la tendencia general histórica de crecimiento de la cobertura urbana/poblada de Huaraz, analizar y determinar las áreas específicas con mayor tendencia a ser ocupadas por cobertura urbana/poblada, para este fin se emplearon las siguientes variables:

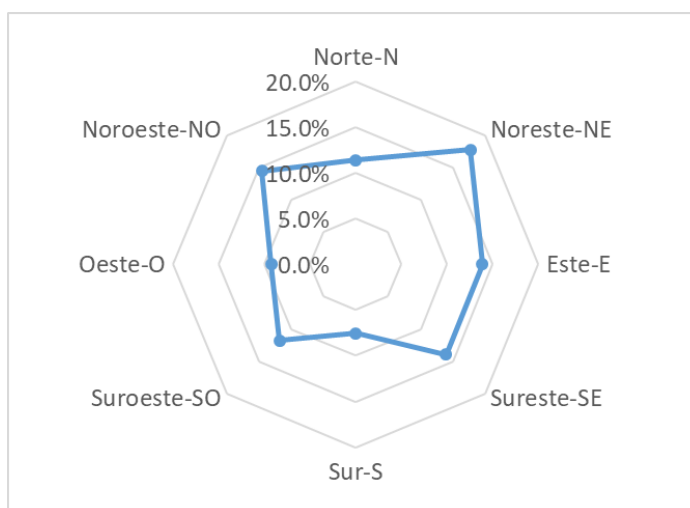


Figura 52. Distribución espacial de la dirección con respecto al centro medio global. Elaborado por el autor.

En la zona de análisis no hay predominio de alguna de las direcciones, sin embargo, la mayor parte de la zona se ubica al Norte (NO-N-NE) del centro medio global (estas zonas tienen al centro medio global hacia el sur).

En cuanto a la evolución de la zona urbana/poblada de la ciudad de Huaraz, el año 1948 (considerado año base de comparación), más del 70% de estas áreas están ubicadas al Sur (SE-S-SO) del centro medio global. Para el año 1962 el área de crecimiento urbano/poblado de 47 ha se orienta de manera balanceada hacia el Norte (NO-N-NE) y Sur (SE-S-SO) del centro medio global, predominando la dirección Norte (N) y siendo la que mayor expansión experimento con respecto al año base la dirección Noreste (NE). Para el año 1977 se tiene un incremento de área de 181.6 ha con respecto a 1962, más del 58% de las nuevas zonas urbanas/pobladas se ubican al Norte (NO-N-NE) del centro medio global, predominando la dirección nuevamente la dirección Norte (N), siendo la dirección de mayor crecimiento relativo a 1962 la Suroeste (SO).

Cuadro 16. Evolución del crecimiento de áreas urbanas/pobladas en relación a su dirección con respecto al centro medio global

Dirección		Año 1948 (Base)		Incremento 1962			Incremento 1977			Incremento 2001			Incremento 2018			Incremento acumulado 1962-2018		
		Área (ha)	%	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel-b	% Per
Norte-N	337.5°-22.5°	7.9	7.1%	12.0	151.9%	25.6%	49.1	409.2%	27.1%	46.5	94.7%	18.7%	44.8	96.3%	24.1%	152.5	1929.0%	23.0%
Noreste-NE	22.5°-67.5°	2.1	1.9%	3.3	157.4%	7.0%	21.3	645.3%	11.7%	38.1	178.6%	15.3%	33.8	88.7%	18.1%	96.4	4595.1%	14.5%
Este-E	67.5°-112.5°	5.9	5.3%	2.9	49.2%	6.2%	10.5	363.8%	5.8%	36.6	348.7%	14.7%	22.4	61.2%	12.0%	72.3	1235.4%	10.9%
Sureste-SE	112.5°-157.5°	25.4	22.9%	8.4	33.0%	17.9%	14.2	169.8%	7.8%	23.3	163.9%	9.4%	9.3	39.7%	5.0%	55.2	217.3%	8.3%
Sur-S	157.5°-202.5°	29.0	26.2%	7.6	26.2%	16.3%	34.5	453.3%	19.0%	42.1	121.9%	16.9%	15.8	37.5%	8.5%	100.1	344.6%	15.1%
Suroeste-SO	202.5°-247.4°	23.8	21.4%	0.8	3.4%	1.7%	6.7	817.1%	3.7%	13.5	201.9%	5.4%	18.8	139.4%	10.1%	39.8	167.5%	6.0%
Oeste-O	247.5°-292.5°	12.5	11.3%	3.6	28.6%	7.7%	9.7	270.2%	5.3%	26.1	269.3%	10.5%	22.4	85.5%	12.0%	61.8	492.8%	9.3%
Noroeste-NO	292.5°-337.5°	4.4	4.0%	8.2	186.1%	17.6%	35.5	430.6%	19.5%	22.8	64.2%	9.2%	19.0	83.3%	10.2%	85.5	1930.2%	12.9%
Total		111.0	100.0%	46.9		100.0%	181.6		100.0%	249.0		100.0%	186.2		100.0%	663.6		100.0%
Máximo		29.0		12.0			49.1			46.5			44.8			152.5		
Mínimo		2.1		0.8			6.7			13.5			9.3			39.8		
Promedio		13.9		5.9			22.7			31.1			23.3			83.0		
Desviación estándar		10.6		3.8			15.4			11.3			11.1			34.9		

% Rel = Porcentaje de incremento relativo al año anterior

% Año = Porcentaje de incremento correspondiente al año en estudio

% Rel-b = Porcentaje de incremento acumulado 1962-2018 relativo al año base

% Per = Porcentaje de incremento acumulado para el período 1962-2018

Fuente. Elaborado por el autor

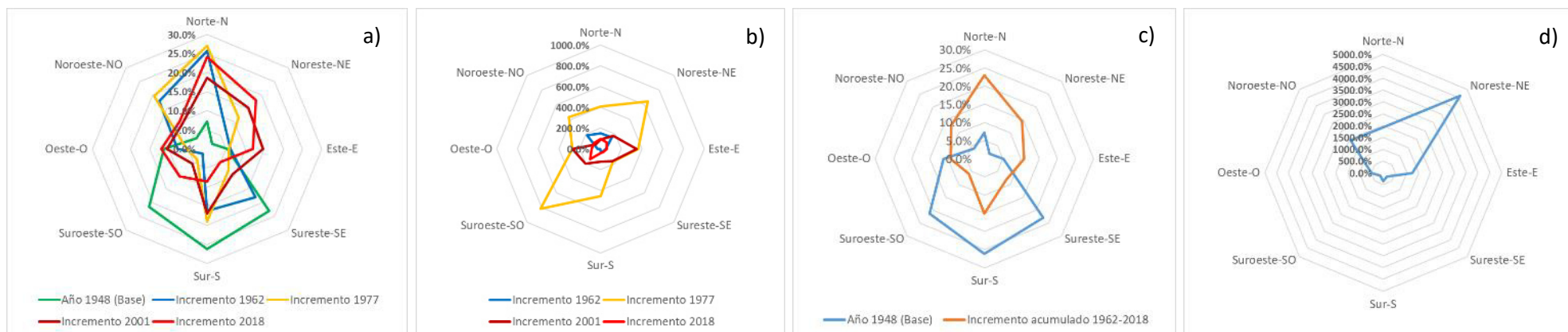


Figura 53. Áreas de crecimiento urbano/poblado versus dirección con respecto al centro medio global. a) Distribución porcentual anual, b) Incremento relativo al año anterior, c) Distribución porcentual acumulada 1962-2018, d) Incremento relativo al año base 1948. Elaborado por el autor.

El año 2001 el área de crecimiento urbano/poblado es de 249 ha, predominando un crecimiento de 43% se orienta hacia el Norte (NO-N-NE) y de 32% hacia el Sur (SE-S-SO). De manera similar a los años anteriores predomina la dirección Norte (N) con la mayor extensión, siendo la dirección Este (E) la que experimentó mayor crecimiento con respecto al año 1977. El año 2018 se tienen 186 ha de áreas de crecimiento urbano/poblado manteniéndose un claro predominio de crecimiento hacia el Norte (NO-N-NE) con un 52% del área de expansión, siendo la dirección Norte (N) la de mayor extensión. La dirección Suroeste (SO) es la que experimentó mayor crecimiento en relación al año 2001.

Entre 1962 y 2018 las nuevas áreas urbanas/pobladas de 663.6 ha crecieron un 50% hacia el Norte (NO-N-NE) y un 29% hacia direcciones Sur (SE-E-SO), predomina siempre la dirección Norte (N) con la mayor extensión de crecimiento, siendo la dirección Noreste (NE) la que experimentó un mayor crecimiento porcentual en relación a 1948.

- Distancia desde el centro medio global.

En la zona de análisis las distancias medidas desde el centro medio global llegan a algo más de 3950 metros, evidentemente, dada la ubicación del centro medio global, la distribución de áreas es gaussiana poseyendo una mayor extensión los territorios ubicados entre 2,000 y 2,500 m con un 25% del área total de trabajo.

En 1948 más del 85% de la zona urbana/poblada de Huaraz se encontraba a una distancia máxima de 1,000 metros con respecto al centro medio global.

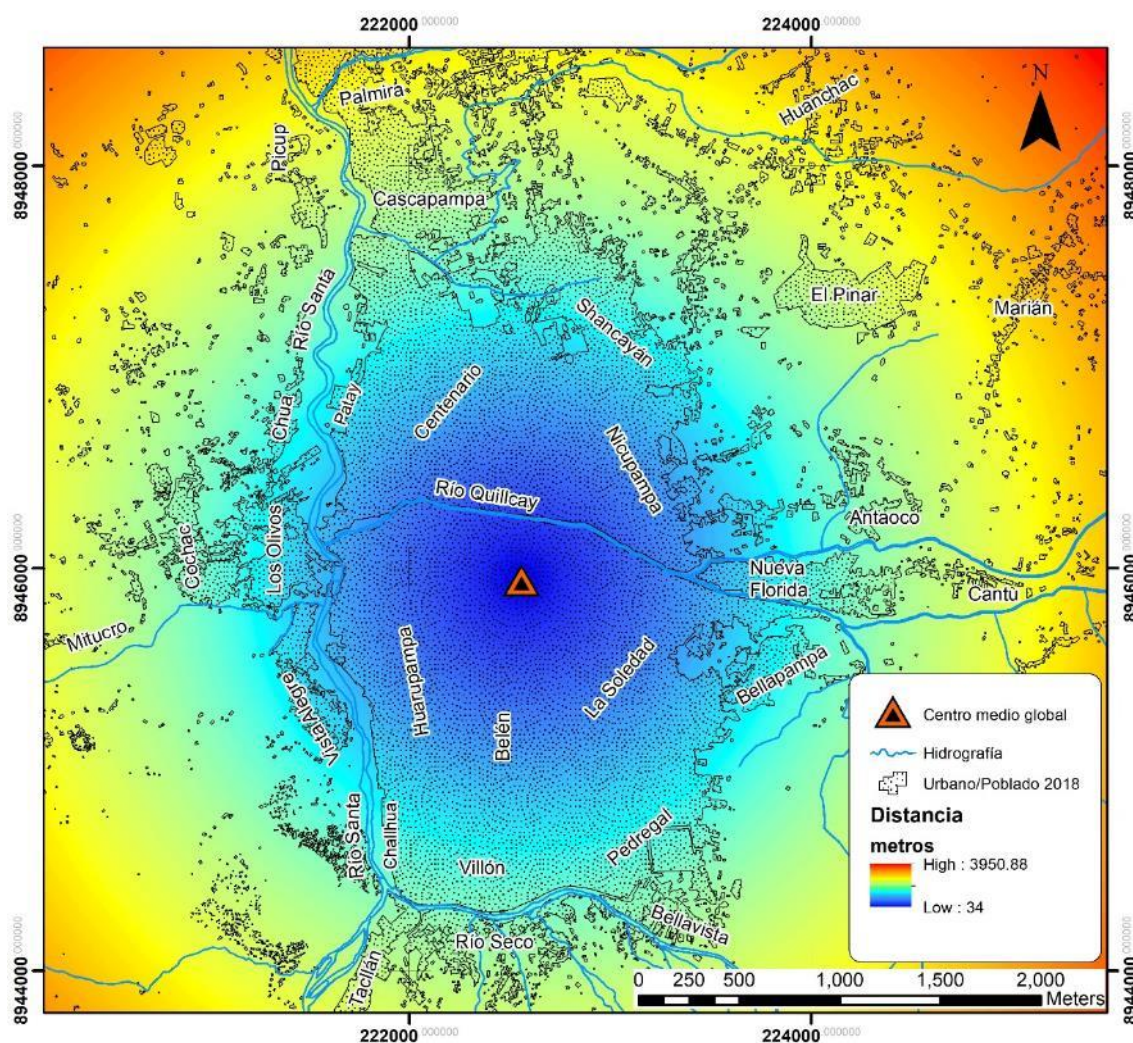


Figura 54. Modelo de distancia con respecto al centro medio global. Elaborado por el autor.

El 82% de las nuevas áreas urbanas/pobladas el año 1962 se ubicaban hasta los 1,500 m del centro medio global, sin embargo, las zonas ubicadas entre 2,500 y 3,500 m del centro medio global fueron las que experimentaron un mayor crecimiento comparado con 1948. En 1977 el 96% de las zonas de expansión urbana/poblada llegaban hasta los 2,000 m con respecto al centro medio global, siendo las zonas urbanas/pobladas ubicadas entre 500 y 1,000 m las que tuvieron un mayor crecimiento en comparación con su extensión en 1962. Para el año 2001 el 99% de las nuevas áreas urbanas/pobladas ya llegaban 3,000 m del centro medio global, siendo las zonas ubicadas entre 2,500 y 3,000 m las que más crecieron en comparación a su extensión en

1977. El año 2018 la ciudad crece hasta los 3,500 m del centro medio global, las nuevas áreas urbanas/pobladas se ubican sobre todo entre los 1,000 y 2,000 m con respecto al centro medio global. La zona mayor de crecimiento urbano acumulado entre 1962 y 2018 se ubica entre los 1,000 y 1,500 m con un 34% de su extensión total, seguida de la ubicada entre 500 y 1,000 m del centro medio global con un 24%. La zona que experimentó un mayor crecimiento acumulado entre 1962 y 2018 en relación a 1948 fue la ubicada entre 2,000 y 2,500 m del centro medio global.

Cuadro 17. Distribución espacial de la distancia con respecto al centro medio global en la zona de análisis.

Rango de distancia (m)	Área (ha)	%
0-500	78.5	3.1%
500-1000	235.6	9.2%
1000-1500	392.6	15.3%
1500-2000	549.7	21.5%
2000-2500	637.6	24.9%
2500-3000	469.6	18.4%
3000-3500	170.8	6.7%
3500-4000	23.9	0.9%
Total	2558.4	100%

Fuente. Elaborado por el autor

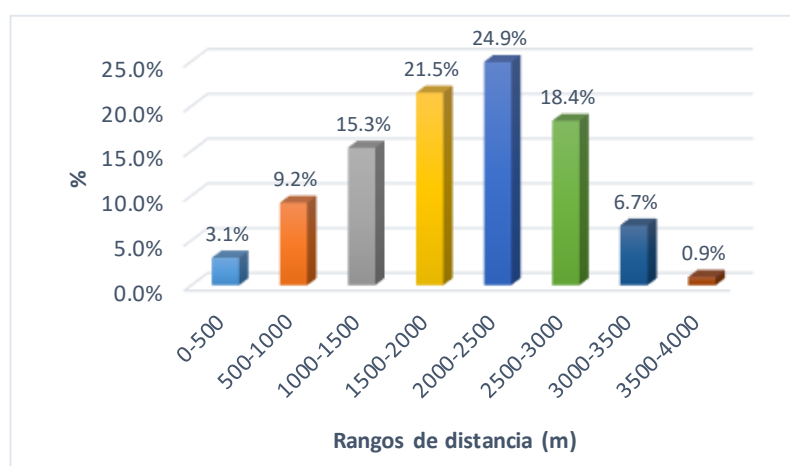


Figura 55. Distribución espacial de la distancia con respecto al centro medio global. Elaborado por el autor.

Cuadro 18. Evolución del crecimiento de áreas urbanas/pobladas en relación a su distancia con respecto al centro medio global

Distancia (m)	Año 1948 (Base)		Incremento 1962			Incremento 1977			Incremento 2001			Incremento 2018			Incremento acumulado 1962-2018		
	Área (ha)	%	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel-b	% Per
0-500	34.42	31.00%	8.86	25.73%	18.91%	26.97	304.49%	14.85%	6.79	25.18%	2.73%	0.00	0.00%	0.00%	42.62	123.82%	6.42%
500-1000	59.98	54.02%	13.07	21.79%	27.90%	80.86	618.56%	44.52%	58.11	71.86%	23.33%	8.42	14.50%	4.53%	160.46	267.52%	24.18%
1000-1500	8.04	7.24%	16.28	202.56%	34.75%	56.03	344.17%	30.85%	91.97	164.13%	36.93%	61.42	66.78%	32.99%	225.70	2808.16%	34.01%
1500-2000	5.35	4.82%	2.23	41.59%	4.75%	10.48	470.96%	5.77%	51.88	494.87%	20.84%	63.28	121.97%	33.99%	127.88	2389.16%	19.27%
2000-2500	1.41	1.27%	1.52	108.36%	3.25%	6.95	456.50%	3.83%	27.56	396.49%	11.07%	31.92	115.84%	17.15%	67.95	4836.29%	10.24%
2500-3000	1.73	1.56%	4.60	265.81%	9.81%	0.31	6.84%	0.17%	11.26	3582.68%	4.52%	18.64	165.50%	10.01%	34.81	2013.26%	5.25%
3000-3500	0.11	0.10%	0.28	253.82%	0.60%	0.00	0.00%	0.00%	1.37	0.00%	0.55%	2.44	178.63%	1.31%	4.09	3717.36%	0.62%
3500-4000	0.00	0.00%	0.02	>	0.04%	0.00	0.00%	0.00%	0.08	>	0.03%	0.03	34.67%	0.01%	0.12	>	0.02%
Total	111.04	100.00%	46.86		100.00%	181.62		100.00%	249.01		100.00%	186.16		100.00%	663.64		100.00%
Máximo	60.0		16.3			80.9			92.0			63.3			225.7		
Mínimo	0.0		0.0			0.0			0.1			0.0			0.1		
Promedio	13.9		5.9			22.7			31.1			23.3			83.0		
Desviación estándar	21.8		6.2			30.3			33.2			26.4			80.8		

% Rel = Porcentaje de incremento relativo al año anterior

% Año = Porcentaje de incremento correspondiente al año en estudio

% Rel-b = Porcentaje de incremento acumulado 1962-2018 relativo al año base

% Per = Porcentaje de incremento acumulado para el período 1962-2018

Fuente. Elaborado por el autor

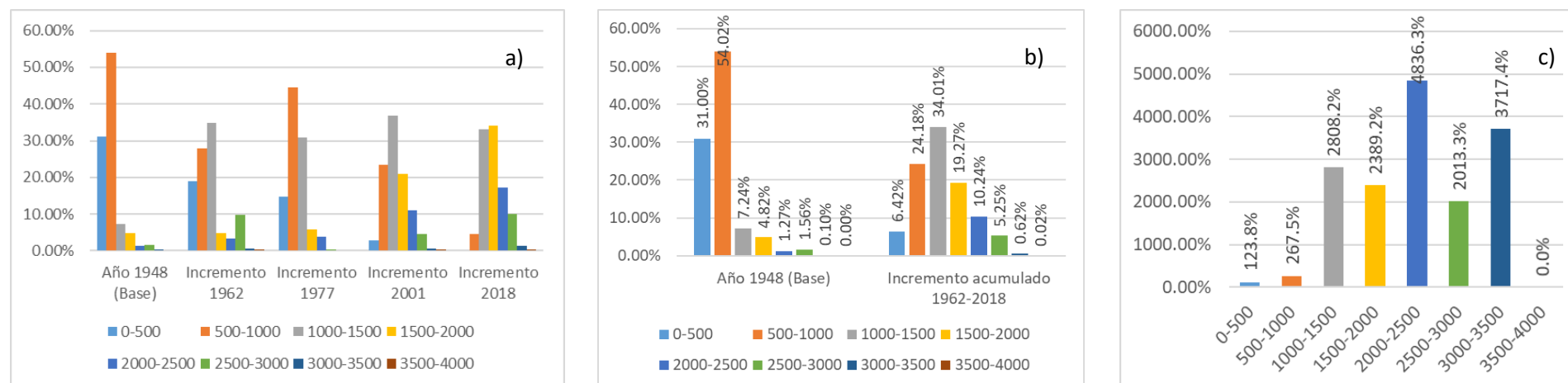


Figura 56. Áreas de crecimiento urbano/poblado versus distancia con respecto al centro medio global. a) Distribución porcentual anual, b) Distribución porcentual acumulada 1962-2018, c) Incremento relativo al año base 1948. Elaborado por el autor.

- Altitud.

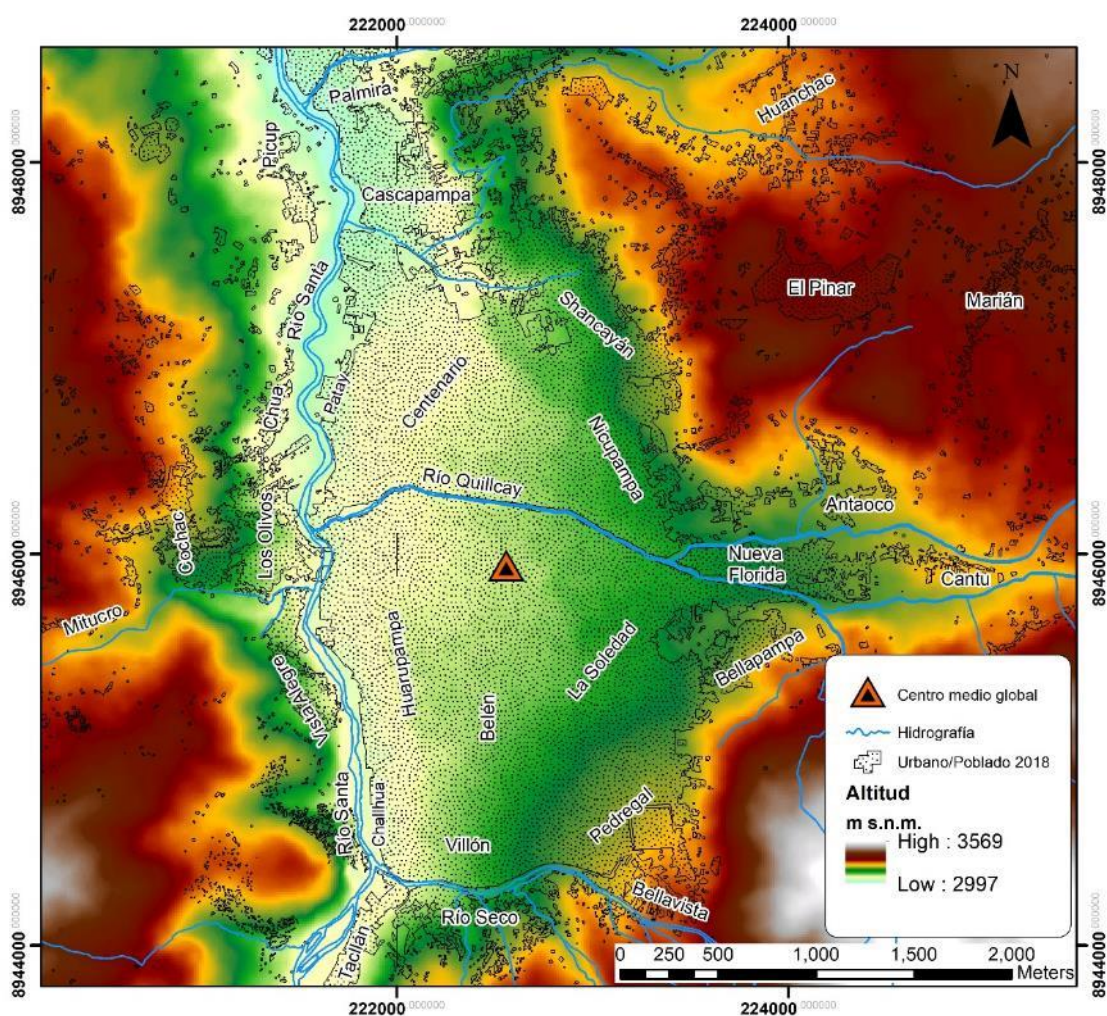


Figura 57. Modelo de elevación digital. Elaborado por el autor en base al DEM ALOS PALSAR AP_27249_FBS_F6990_RT1.

Cuadro 19. Distribución espacial de la altitud con en la zona de análisis.

Rangos de altitud (m s.n.m.)	Área (ha)	%
< 3050	114.3	4.5%
3050 - 3150	859.1	33.6%
3150 - 3250	754.6	29.5%
3250 - 3350	602.6	23.6%
3350 - 3450	147.5	5.8%
> 3450	80.4	3.1%
Total	2558.4	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

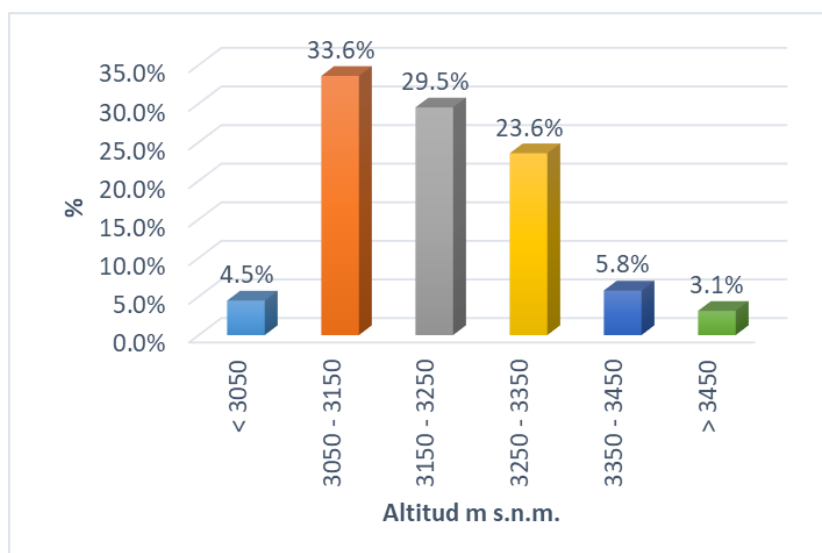


Figura 58. Distribución espacial de la altitud en la zona de análisis. Elaborado por el autor.

La zona de análisis comprende altitudes entre 2,997 y 3,569 m s.n.m. predominando los territorios ubicados entre los 3,050 y 3,350 m s.n.m. con un 87% de la extensión total del área de trabajo.

En cuanto a la evolución anual de las zonas urbanas/pobladas en relación a las altitudes, en 1948 el 99% de ellas se encontraban por debajo de los 3,250 m s.n.m. predominando las ubicadas entre los 3,050 y 3,150 m s.n.m. El año 1962 las nuevas áreas urbanas/pobladas ocuparon territorios que llegaban mayoritariamente hasta los 3,250 m s.n.m. predominando claramente aquellos ubicados entre los 3,050 y 3,150 m s.n.m. Las zonas de expansión ubicadas por debajo de 3,050 m s.n.m. son las que mostraron un mayor crecimiento comparado con su extensión en 1948. En 1977, de manera similar al escenario del año 1962, las nuevas áreas urbanas/pobladas se extienden mayoritariamente hasta los 3,250 m s.n.m. el 88% de estas áreas entre los 3,050 y 3,150 m s.n.m. siendo también las que experimentaron un mayor crecimiento relativo al año 1962.

El año 2001, las áreas de expansión urbana/poblada llegan casi en su totalidad hasta los 3,350 m s.n.m., como en los años anteriores predomina el crecimiento de áreas ubicadas entre los 3,050 y 3,150 m s.n.m. siendo aquellas ubicadas entre los 3,250 y 3,350 m s.n.m. las que experimentaron mayor crecimiento relativo a su extensión en 1977. El año 2018 muestra un escenario parecido al del 2001, casi la totalidad de las nuevas áreas urbanas/pobladas llegan hasta los 3350 m s.n.m. predominando aquellas ubicadas entre los 3,050 y 3,250 m s.n.m. con un 87% del área de total expansión el 2018.

El área de expansión urbana acumulada entre 1962 y 2018 alcanza mayoritariamente altitudes de hasta 3,350 m s.n.m. en comparación con el año 1948 en el que las áreas urbanas/pobladas llegaban hasta los 3,250 m s.n.m., predominan por su extensión en este período las áreas de expansión ubicadas entre los 3,050 y 3,150 m s.n.m. siendo aquellas ubicadas por debajo de los 3,050 m s.n.m. y por encima de los 3,250 m s.n.m. las que experimentaron un mayor crecimiento porcentual comparado con su extensión el año 1948.

Cuadro 20. Evolución del crecimiento de áreas urbanas/pobladas en relación a su altitud

Altitud	Año 1948 (Base)		Incremento 1962			Incremento 1977			Incremento 2001			Incremento 2018			Incremento acumulado 1962-2018		
	Área (ha)	%	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel-b	% Per
< 3050	1.40	1.3%	3.84	274.28%	8.19%	12.36	322.18%	6.81%	23.40	189.30%	9.40%	11.93	50.95%	6.41%	51.53	3683.06%	7.76%
3050 - 3150	101.83	91.7%	35.75	35.10%	76.29%	159.56	446.37%	87.85%	169.73	106.38%	68.16%	96.56	56.89%	51.87%	461.59	453.28%	69.55%
3150 - 3250	6.99	6.3%	6.24	89.36%	13.33%	9.68	155.00%	5.33%	34.47	356.10%	13.84%	64.56	187.29%	34.68%	114.95	1644.79%	17.32%
3250 - 3350	0.82	0.7%	1.01	123.29%	2.15%	0.02	1.72%	0.01%	21.33	123278.44%	8.57%	13.10	61.40%	7.03%	35.45	4335.01%	5.34%
3350 - 3450	0.00	0.0%	0.02	>	0.04%	0.00	0.00%	0.00%	0.08	>	0.03%	0.03	34.67%	0.01%	0.12	>	0.02%
Total	111.04	100.0%	46.86		100.00%	181.62		100.00%	249.01		100.00%	186.16		100.00%	663.64		100.00%
Máximo	101.83		35.75			159.56			169.73			96.56			461.59		
Mínimo	0.00		0.02			0.00			0.08			0.03			0.12		
Promedio	22.21		9.37			36.32			49.80			37.23			132.73		
Desviación estándar	44.60		14.94			69.11			68.19			41.45			188.48		

% Rel = Porcentaje de incremento relativo al año anterior

% Año = Porcentaje de incremento correspondiente al año en estudio

% Rel-b = Porcentaje de incremento acumulado 1962-2018 relativo al año base

% Per = Porcentaje de incremento acumulado para el período 1962-2018

Fuente. Elaborado por el autor

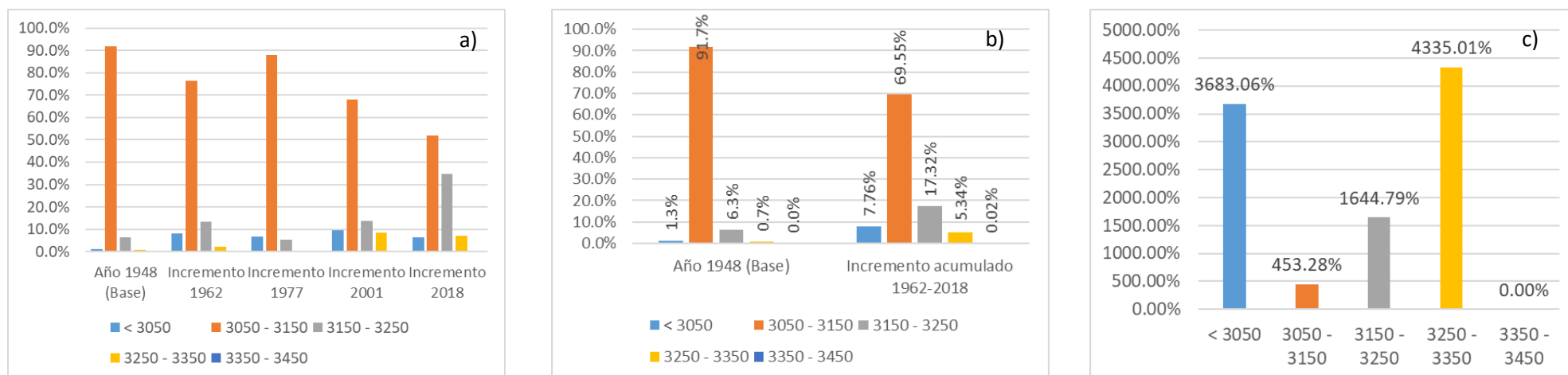


Figura 59. Áreas de crecimiento urbano/poblado versus altitud. a) Distribución porcentual anual, b) Distribución porcentual acumulada 1962-2018, c) Incremento relativo al año base 1948. Elaborado por el autor.

- Pendiente

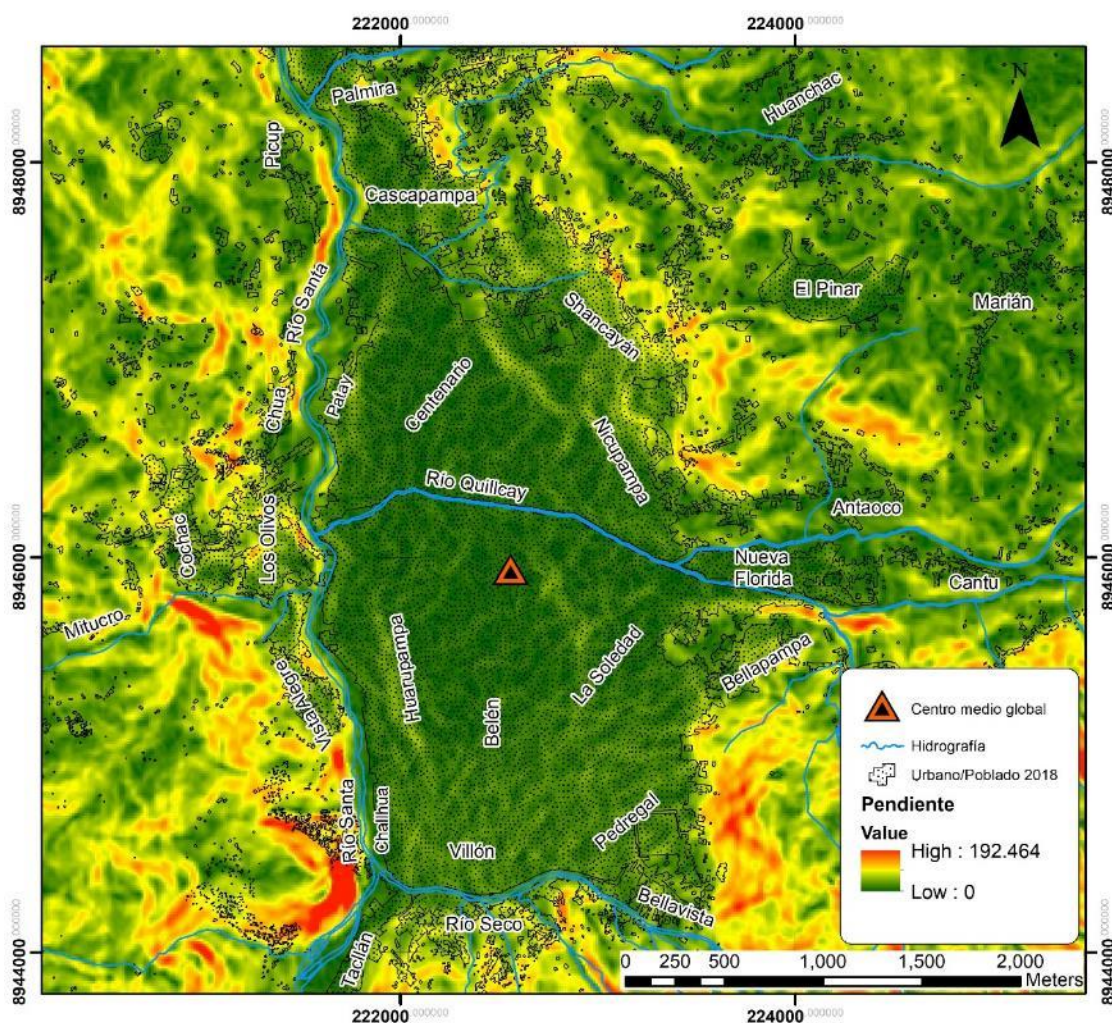


Figura 60. Modelo de pendientes en grados. Elaborado por el autor en base al DEM ALOS PALSAR AP_27249_FBS_F6990_RT1.

La ciudad de Huaraz se asentó históricamente sobre un depósito aluvial. Cerca de la tercera parte de la zona de análisis muestra pendientes entre 15 y 30% estos territorios se ubican predominantemente en la zona urbano marginal y rural de la ciudad de Huaraz. En la zona de mayor cobertura urbana predominan de hasta 15%.

En 1948 la ciudad de Huaraz se asentaba sobre territorios que en un 93% tenían pendientes máximas de 15% predominando, con mayor detalle, aquellos con pendientes entre 3 y 8% con el 56% del área total.

Cuadro 21. Distribución espacial de la pendiente en la zona de análisis

Rangos de Pendiente (%)	Área (ha)	%
0 - 3	87.7	3.4%
3 - 8	411.2	16.1%
8 - 15	533.3	20.8%
15 - 30	822.8	32.2%
30 - 45	461.6	18.0%
45 - 65	201.4	7.9%
> 65	40.3	1.6%
Total	2558.4	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

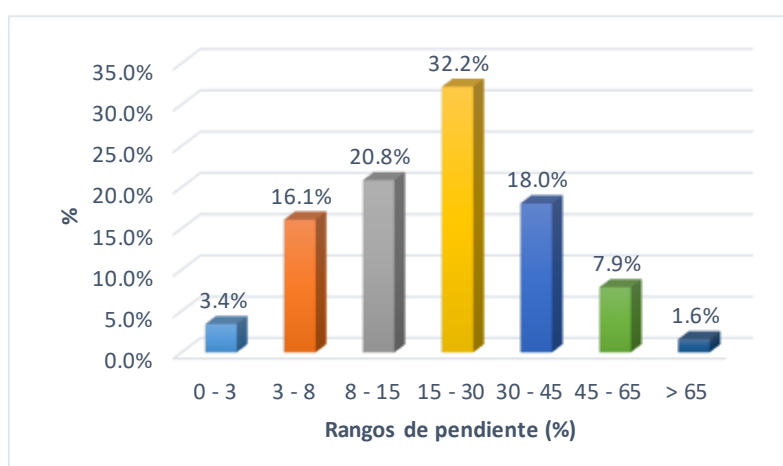


Figura 61. Distribución espacial de la pendiente en la zona de análisis. Elaborado por el autor.

El año 1962 las nuevas zonas de crecimiento urbano/poblado se ubicaron en un 99% en territorios con pendientes de hasta 30% siempre dentro del depósito aluvial, predominando aquellos territorios con pendientes entre 3 y 15% con un 77% del área total este año. Aparecen mínimamente territorios con pendientes superiores al 30% que porcentualmente son las que crecieron más con respecto a 1948 pero aún con una extensión reducida. En 1977 las áreas de crecimiento urbano/poblado mantuvieron su desarrollo en territorios con pendientes máximas del 30% de manera similar al año 1948, predominando también aquellos territorios con pendientes entre 3 y 15% con 77% del área total.

Cuadro 22. Evolución del crecimiento de áreas urbanas/pobladas en relación a su pendiente

Rangos de Pendiente (%)	Año 1948 (Base)		Incremento 1962			Incremento 1977			Incremento 2001			Incremento 2018			Incremento acumulado 1962-2018		
	Área (ha)	%	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel	% Año	Área (ha)	% Rel-b	% Per
0 - 3	17.19	15.48%	5.62	32.71%	12.00%	22.06	392.37%	12.15%	12.17	55.14%	4.89%	4.76	39.12%	2.56%	44.61	259.51%	6.72%
3 - 8	62.09	55.92%	20.98	33.79%	44.78%	88.29	420.82%	48.61%	68.05	77.07%	27.33%	25.02	36.77%	13.44%	202.34	325.88%	30.49%
8 - 15	23.73	21.37%	15.14	63.80%	32.32%	55.68	367.70%	30.66%	96.32	173.01%	38.68%	44.62	46.33%	23.97%	211.76	892.27%	31.91%
15 - 30	7.48	6.73%	4.50	60.22%	9.61%	14.89	330.83%	8.20%	63.04	423.25%	25.32%	74.79	118.64%	40.18%	157.23	2103.20%	23.69%
30 - 45	0.49	0.44%	0.59	118.90%	1.25%	0.67	114.40%	0.37%	8.49	1267.94%	3.41%	30.27	356.67%	16.26%	40.01	8131.31%	6.03%
45 - 65	0.06	0.05%	0.02	37.72%	0.05%	0.02	101.36%	0.01%	0.95	4142.89%	0.38%	6.17	650.50%	3.32%	7.17	11964.34%	1.08%
> 65	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00%	0.00	0.00%	0.00%	0.00	0.00%	0.00%	0.52	>	0.28%	0.52	>	0.08%
Total	111.04	1.00	46.86		1.00	181.62		1.00	249.01		1.00	186.16		1.00	663.64		100.00%
Máximo	62.09		20.98			88.29			96.32			74.79			211.76		
Mínimo	0.00		0.00			0.00			0.00			0.52			0.52		
Promedio	15.86		6.69			25.95			35.57			26.59			94.81		
Desviación estándar	22.39		8.25			33.89			39.25			26.58			92.40		

% Rel = Porcentaje de incremento relativo al año anterior

% Año = Porcentaje de incremento correspondiente al año en estudio

% Rel-b = Porcentaje de incremento acumulado 1962-2018 relativo al año base

% Per = Porcentaje de incremento acumulado para el período 1962-2018

Fuente. Elaborado por el autor

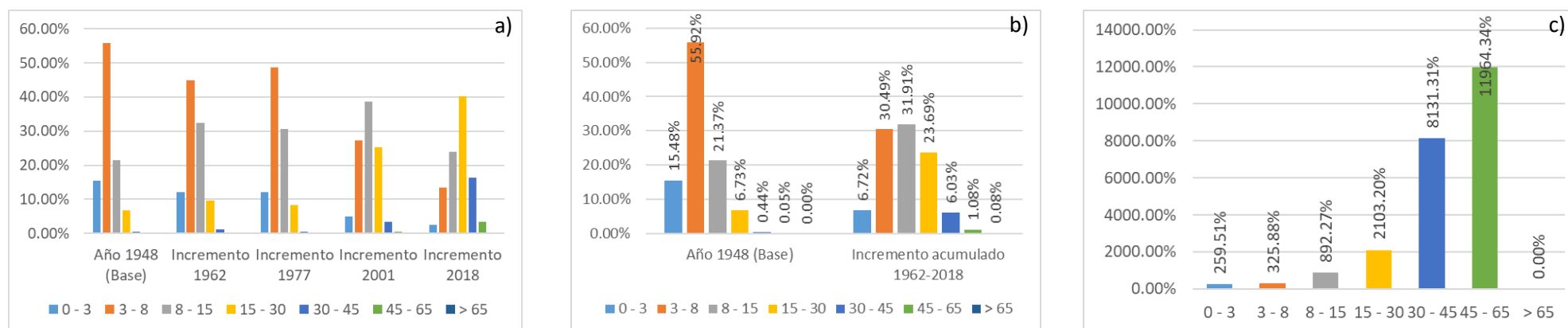


Figura 62. Áreas de crecimiento urbano/poblado versus pendiente. a) Distribución porcentual anual, b) Distribución porcentual acumulada 1962-2018, c) Incremento relativo al año base 1948. Elaborado por el autor.

En 1977 son las áreas de expansión con pendientes entre 3 y 15% las que experimentaron mayor crecimiento porcentual con respecto a 1962. El año 2001 las nuevas zonas urbanas/pobladas se extienden hasta territorios con pendientes que llegaban a 45%, sin embargo, predominando los territorios entre 3 y 30%, siendo aquellos ubicados entre 3 y 8% los que observaron mayor crecimiento relativo a 1977. Esta evolución se explica con el crecimiento de barrios como Shancayán, Nicrupampa, Los Olivos, Nueva Florida, Villón y Pedregal ubicados en áreas más empinadas y con geología que incluye áreas fluvio-glaciares o volcánicas.

El año 2018 las nuevas áreas urbanas/pobladas llegan a territorios cuya pendiente supera el 45%, aunque en un bajo porcentaje. Predominan este año áreas de crecimiento con pendientes entre 3% y 30% con énfasis en aquellas con pendientes entre 15% y 30%. Porcentualmente con respecto al año 2001 son las áreas ubicadas en territorios con pendientes superiores al 45% las que experimentaron mayor crecimiento, pero siempre con una baja extensión correspondiente al 2018.

Entre 1962 y 2018 se tuvo un crecimiento de áreas urbanas pobladas de 664 ha, las nuevas áreas urbanas fueron ocupando paulatinamente territorios cada vez más empinados llegando a superar el 45% de pendiente. En este período las áreas de crecimiento predominante se ubican entre 3% y 30% de pendiente a diferencia de 1948 año en el que las pendientes predominantes llegaban al 15%. Las áreas de crecimiento urbano/poblado que experimentaron mayor crecimiento porcentual versus 1948 fueron las ubicadas por encima del 30%.

- Densidad de puntos.

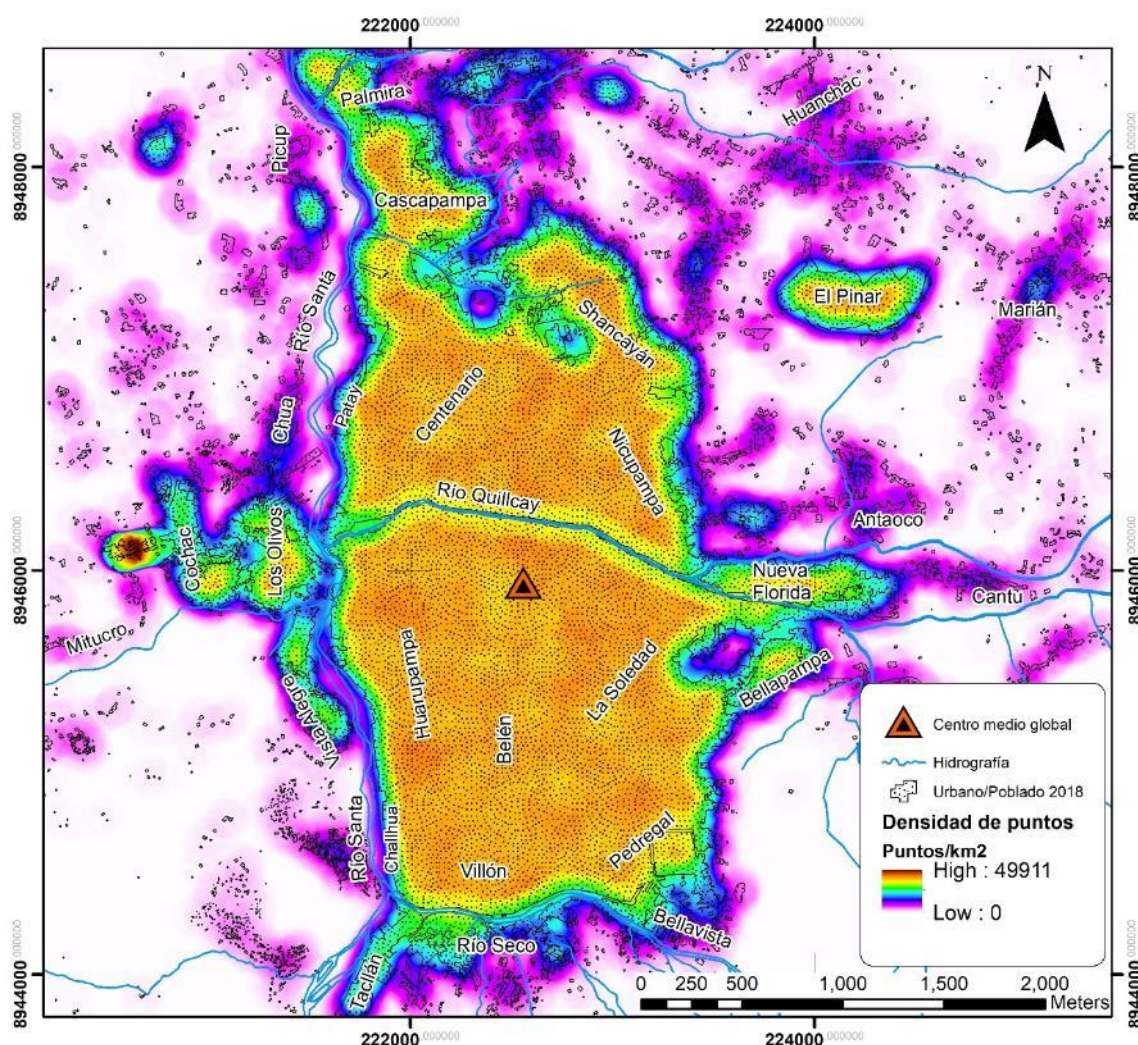


Figura 63. Modelo de densidad de puntos en las zonas urbanas/pobladas. Elaborado por el autor.

Este modelo se deriva de las capas de nube de puntos integradas correspondiente a los años 1948 al 2018 basados en un área mínima de 5m^2 y una separación de 2.24 m (la raíz cuadrada del área mínima). Esta capa ráster obtiene valores entre 0 y 49,911 puntos/ km^2 y se trata de una variable ficticia de apoyo en la que, evidentemente, las áreas urbanas/ pobladas con mayor extensión son las que poseen mayor densidad de puntos información que será utilizada en los siguientes procesos de análisis de regresión logística y Evaluación Multicriterio.

4.1.3. Análisis prospectivo del crecimiento de la ciudad de Huaraz

Empleando como variable dependiente la cobertura urbana/poblada del año 2018 y como variables independientes la altitud, distancia al centro medio global y pendientes se ejecutó una regresión logística a fin de identificar las nuevas áreas con potencial de crecimiento urbano/poblado. Para ejecutar la regresión logística no se empleó la densidad de puntos debido a que luego de las primeras corridas del modelo se observaron resultados espacialmente incoherentes, esto se debe a que la variable está directamente correlacionada con la cobertura urbana/poblada afectando la validez de los resultados. La variable orientación tampoco fue empleada en este modelo pues luego de las primeras corridas se verificó que distorsionaba la calidad del modelo de crecimiento debido al cambio súbito en los valores de los píxeles alrededor de 0°-360°. Se analizó inicialmente la colinealidad de las variables mediante el coeficiente de Pearson sobre 10,000 puntos aleatorios en toda la zona de análisis, la correlación entre altitud-pendiente y distancia al centro medio global- pendiente es positiva y débil, sin embargo, entre las variables distancia al centro medio global-altitud es positiva y moderada. En todos los casos el coeficiente de correlación no es fuerte, hecho que permite su empleo como variables para la regresión logística.

Cuadro 23. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables empleadas en la regresión logística

Variable	Pendiente	Altitud	Distancia
Pendiente	1.000	----	----
Altitud	0.366	1.000	----
Distancia	0.271	0.636	1.000

Fuente. Elaborado por el autor

Se aplicó el procedimiento de regresión logística utilizando una muestra estratificada aleatoria de 30% a fin de optimizar el

tiempo de procesamiento y reducir la dependencia espacial. El resultado obtenido es la ecuación de regresión, un reporte estadístico y un mapa de probabilidad de crecimiento urbano.

$$\text{Logit (Áreas urbanas/pobladas)} = 27.9786 - 0.0077 \cdot \text{Altitud} - 0.0018 \cdot \text{Distancia al centro medio global} - 0.0654 \cdot \text{Pendiente}$$

Cuadro 24. Coeficientes de regresión individuales

Variables	Promedio	Desviación estándar	Coeficiente	Coeficiente estandarizado	Estadístico t (*)	P-value (*)
Interseptor	-----	-----	27.979	-----		
Altitud (m s.n.m.)	3201.094	111.227	-0.008	-0.260	-101.220	< .00001
Distancia al centro medio global (m)	1962.548	753.522	-0.002	-0.412	-156.611	< .00001
Pendiente (%)	22.325	16.011	-0.065	-0.318	-70.474	< .00001

Fuente. Elaborado por el autor

(*) Obtenido en base a 10,000 puntos aleatorios y 0.05 de significancia

Cuadro 25. Estadísticas de regresión

Número de observaciones totales	25592224
Número de 0s en el área de estudios	17887206
Número de 1s en el área de estudios	7705018
Porcentaje de 0s en el área de estudio	69.8931
Porcentaje de 1s en el área de estudio	30.1069
Número de observaciones automuestreadas	6652035
Número de 0s en el área muestreada	4651629
Número de 1s en el área muestreada	2000406
Porcentaje de 0s en el área muestreada	69.9279
Porcentaje de 1s en el área muestreada	30.0721
-2logL0	8135091.41
-2log(lprobabilidad)	4329316.25
Bondad del ajuste	6449617.09
Pseudo R ²	0.4678
Chi-square (df=3)	3805775.17

Fuente. Elaborado por el autor

Cuadro 26. Tabla ajustada de contingencia de la clasificación (umbral de corte = 0.4167)

Observado	Predicho 0	Predicho 1	% correcto
No urbano - 0	4204223	447406	90.38%
Urbano - 1	447406	1553000	77.63%

Fuente. Elaborado por el autor

El modelo de regresión logística obtenido muestra un pseudo R^2 de 0.4678 lo que indica un buen nivel de ajuste entre los datos observados y modelados (valores mayores a 0.2 muestran un buen nivel de ajuste relativo). En la tabla de contingencia de la clasificación se llega a un 78% de exactitud en la asignación de áreas urbanas/pobladas tomado como umbral de corte el valor 0.4167, con un porcentaje global de acierto del 84%. Se obtiene un odds ratio o razón de probabilidades de 32.6, es decir, existe una alta probabilidad de que los valores modelados coincidan con los observados (odds ratio mayor y alejado de 1).

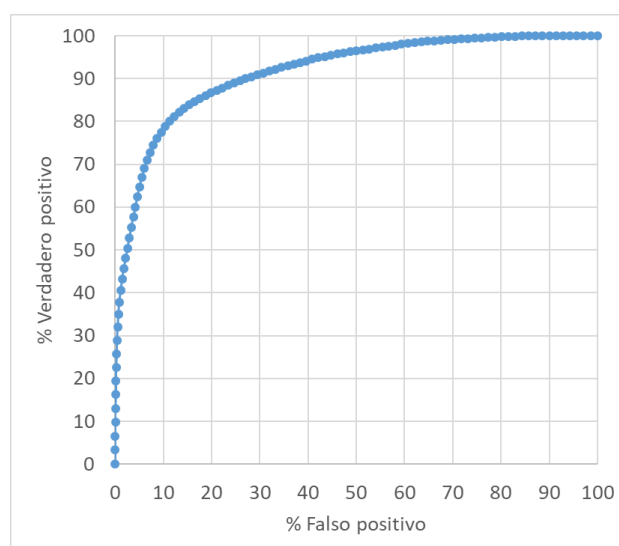


Figura 64. Curva de evaluación del modelo de probabilidad de pertenencia a zonas urbanas/pobladas. Elaborado por el autor.

Para evaluar el mapa de probabilidades de pertenencia a nuevas zonas urbanas/pobladas se empleó el análisis ROC (Relative Operating Characteristic) que cruza este mapa con el mapa actual (2018) de presencia de zonas urbanas/pobladas con el modelo de probabilidades hallando el porcentaje de verdaderos positivos y falsos positivos en cada umbral establecido (100 umbrales o intervalos equidistantes). El área bajo la curva (Area Under Curve - AUC) de la figura 64 determina el valor del estadístico ROC, para nuestro caso alcanza un valor

de 0.916, es decir un alto nivel de ajuste entre los resultados modelados y los observados.

Los coeficientes de la ecuación de regresión logística no tienen una interpretación física per se, su magnitud, una vez estandarizada permite evaluar su nivel de influencia sobre la variable independiente en comparación a las otras variables independientes, su signo indica si la influencia de la variable es directa o inversa.

Observando los coeficientes, es la distancia al centro medio global la variable que tiene mayor influencia en el establecimiento de nuevas áreas urbanas/pobladas seguida de la pendiente, siendo la altitud la variable de menor influencia en este proceso. Las tres variables tienen un efecto negativo sobre la probabilidad de crecimiento urbano, es decir, cuando estas variables crecen se reduce la probabilidad de pertenecer a un área urbana/poblada. Efectivamente, observando la evolución del área urbana/poblada en la ciudad de Huaraz, zona urbano marginal y rural, se evidencia que el crecimiento de la ciudad fue radial a partir de su centro histórico, aún en 1977 año en el que se observa un considerable crecimiento del área urbana/poblada, éste mantiene el centro histórico y el centro medio global como núcleo de crecimiento sobre todo hacia el norte en los barrios emergentes del actual distrito de Independencia. Las nuevas áreas urbanas/pobladas ocuparon tanto áreas con mayor altitud y pendientes relativas al núcleo histórico como en los barrios de Nicrupampa al Norte, Pedregal y Villón al Sur. El barrio de Centenario, al Sur del centro medio global, ocupó territorios con pendientes llanas y menores altitudes en comparación al territorio ocupado en 1948.

Entre los años 2001 y 2018 se consolida el bloque urbano de la ciudad conectándose finalmente aquellos parches

anteriormente considerados parte de la zona urbano marginal pero siempre manteniendo el núcleo histórico de 1948 y el centro medio global como ejes de crecimiento. Se desarrollan sobre todo los barrios de Shancayán, Nicrupampa y Patay al Norte; y los barrios de Pedregal, Rosas Pampa, Challhua y Villón al Sur. Estos años también se observa un marcado desarrollo al Este en el barrio de Nueva Florida en plena zona aluviónica ocupando áreas de mayor elevación y pendientes moderadas. Al Oeste surge un bloque urbano marginal en franco crecimiento aun actualmente correspondiente a los barrios de Los Olivos, Cochac y Vista Alegre ocupando territorios con mayores pendientes y altitudes que el bloque urbano, inclusive áreas accidentadas. Se evidencia también un incremento de la poblada en la zona rural alrededor de la ciudad, pero de manera dispersa y desordenada.

Del mapa o modelo de probabilidad de ocupación de nuevas áreas urbanas/pobladas obtenido de la regresión logística podemos observar que el 30% de la zona en trabajo corresponde áreas urbanas/pobladas el año 2018, excluyendo estas áreas y como podría esperarse, se tiene que los territorios con probabilidad muy baja o nula de crecimiento urbano/poblado son las dominantes con un 79% (55% del área total de análisis), se trata de territorios muy alejados del centro y accidentados o de difícil accesibilidad en la zona rural en la que para el año 2018 se observa un crecimiento sostenido pero disperso de zonas pobladas. Teniendo en cuenta los signos negativos de los coeficientes de la ecuación de regresión logística y la dominancia de la variable distancia al centro medio global, se explica la obtención bajas probabilidades en los territorios alejados del centro, con mayores pendientes y altitudes en los que, además, el área de ocupación urbana/poblada es baja y dispersa.

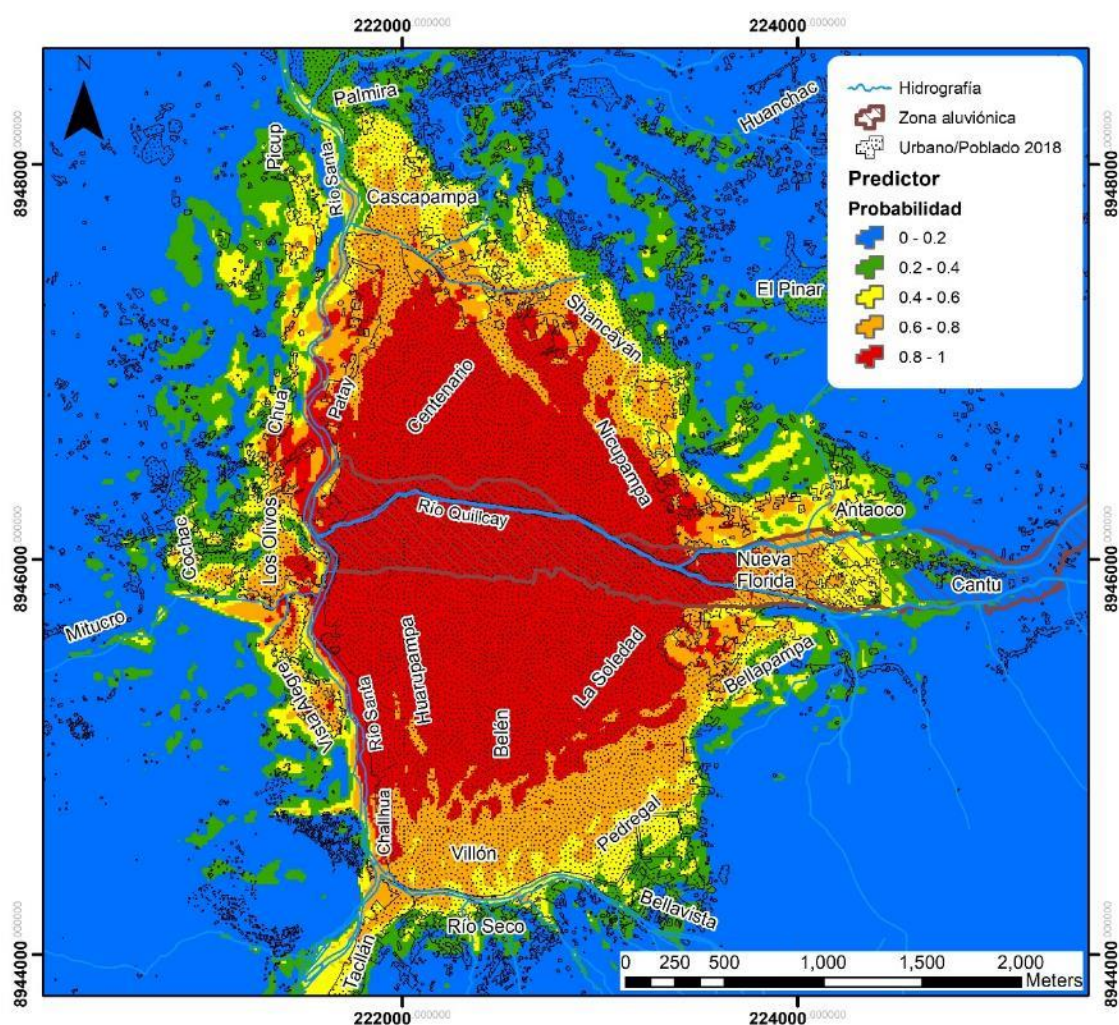


Figura 65. Probabilidad de crecimiento urbano en la zona de análisis. Elaborado por el autor.

Cuadro 27. Distribución espacial de la probabilidad de crecimiento urbano en la zona de análisis

Probabilidad	Área	%
Urbano 2018	774.7	30.3%
Prob. 0.0 - 0.2	1401.8	54.8%
Prob. 0.2 - 0.4	201.3	7.9%
Prob. 0.4 - 0.6	81.5	3.2%
Prob. 0.6 - 0.8	62.8	2.5%
Prob. 0.8 - 1.0	36.3	1.4%
Total	2558.4	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

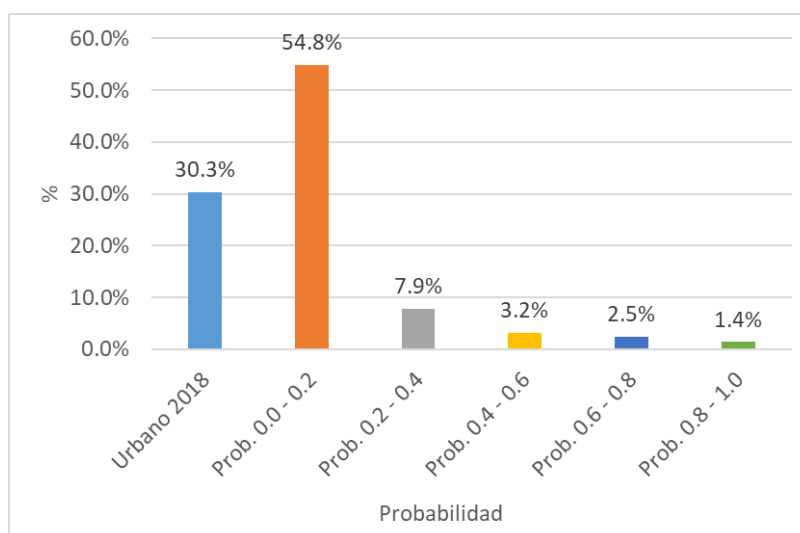


Figura 66. Distribución espacial de la probabilidad de crecimiento urbano en la zona de análisis. Elaborado por el autor.

Igualmente, excluyendo las áreas urbanas/pobladas del año 2018, se tiene que 201 ha o el 11% (8% de la zona de análisis total) presenta una probabilidad baja a moderada, entre 0.2 y 0.4, de albergar nuevas zonas urbanas/pobladas, es el rango de probabilidad con mayor extensión y se trata de áreas urbano marginales en contacto con el bloque urbano del año 2018 y minoritariamente algunos sectores rurales cercanos. Se presentan sobre todo al Norte de la ciudad en los sectores de Picup y Chua Alta en la margen Oeste del río Santa lugares actualmente ocupados por áreas de uso agropecuario y forestal, pero un crecimiento disperso de áreas pobladas creciente desde 1948. También en la margen Oeste del río Santa y hacia el Sur de la ciudad en esta misma clase se observan territorios en los sectores de Los Olivos, Cochac, Vista Alegre y Mitucro, son áreas agropecuarias de subsistencia asociadas a las zonas pobladas en franco crecimiento en estos sectores, pero en desorden y en condiciones de hacinamiento y precariedad.

Al Norte de la Ciudad en el distrito de Independencia, se tienen territorios con probabilidades entre 0.2 y 0.4 en las partes altas de los barrios de Cascapampa, Palmira, El Pinar y Shancayán, se trata de áreas aún con uso agropecuario de subsistencia y

forestal, pero con un acentuado cambio hacia un uso urbano/poblacional en base a los escenarios observados desde 1948. Al Oeste de la ciudad de Huaraz también se tiene un importante sector dentro de esta clase en los barrios de Nueva Florida y Antaoco en el distrito de Independencia, y Bellapampa en el distrito de Huaraz, en todos los casos se trata de áreas agropecuarias asociadas a zonas urbanas que han experimentado un gran crecimiento desde 1948, pero con una evidente falta de planificación. Al Sur de la ciudad, en los barrios de Pedregal, Río Seco y Tacllán también se tiene sectores de crecimiento potencial dentro esta clase, se trata de áreas accidentadas muy susceptibles a procesos erosivos con uso pecuario extensivo de subsistencia que han experimentado un crecimiento importante desde 1948.

Los territorios con una probabilidad media, entre 0.4 y 0.6, de cambiar a un uso urbano/poblacional ocupan 82 ha o el 5% del área de trabajo excluyendo la zona urbana/poblada del 2018 (3% del área total). A partir de este rango de probabilidad se puede apreciar que se trata de zonas urbano marginales muy vinculadas a la zona urbana en las que el uso agropecuario y forestal que albergaban está cambiando rápidamente a un uso urbano, lamentablemente en condiciones de falta de planificación hecho que da lugar a condiciones precarias de construcción y ocupación. Existen áreas importantes de esta clase al Oeste de la ciudad en la zona aluviónica en el barrio de Nueva Florida, así como en los barrios de Nicrupampa, Antaoco y Bellapampa; todos ellos han experimentado un fuerte crecimiento desde 1948. Al Sur de la ciudad existe un sector importante en Tacllán, en áreas aluviales correspondientes al cauce del río Santa. Existen también áreas reducidas de esta clase en los sectores de Vista Alegre, Los Olivos y Cochac en la margen Oeste del río Santa y un área considerable al Noroeste de la ciudad en los sectores de Chua Baja y Picup.

Los territorios que presentan una probabilidad alta (0.6 a 0.8) a muy alta (0.8 a 1) podrían ser considerados en un solo bloque de análisis, tanto por su extensión como por su nivel de relación y cercanía a la zona urbana del año 2018, en conjunto ocupan el 6% del área de estudio excluyendo la zona urbana/poblada (4% del área total). Se trata de zonas en transición hacia un uso urbano en las que se observan los impactos de un crecimiento desordenado de la zona urbana como áreas degradadas por residuos sólidos y aguas residuales domésticas sobre todo en las márgenes del río santa donde se tienen muy alta probabilidad de seguir siendo ocupada precariamente en el sector de Challhua, donde actualmente se desarrollan actividades económicas como el comercio y la extracción de agregados de construcción, y existen áreas pobladas en condiciones de precariedad.

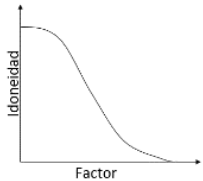
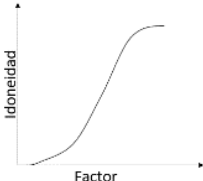
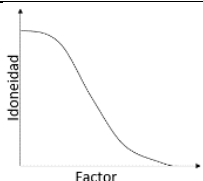
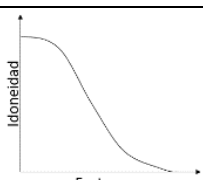
En los sectores de Vista Alegre, Los Olivos y Chua Baja al Oeste de la ciudad se observan áreas considerables de estas clases, se trata de áreas abiertas sin uso, pequeñas parcelas agrícolas de subsistencia y áreas comerciales vinculadas al rubro automotriz y de transportes. Vistas las condiciones de evolución de las áreas urbanas pobladas desde 1948, se espera que éstas crezcan también de manera desordenada. Al norte de la ciudad, en los barrios de Quinuacocha, Centenario y Shancayán se tienen áreas abiertas que pueden considerarse área ya absorbidas por la ciudad pues son áreas de tránsito asociadas infraestructura turística y educativa. Otro importante sector perteneciente a estas clases de alta probabilidad de ocupación urbana/poblada se encuentra al Este de la ciudad de Huaraz en los sectores de Nicrupampa y Antaoco en el distrito de Independencia, y Bellapampa en el distrito de Huaraz todos ellos ocupados por pequeñas parcelas agrícolas de subsistencia o

áreas abiertas sin uso con algunas especies forestales como cerco vivo (Eucalipto).

En panorámica, teniendo en cuenta la altitud, pendiente y distancia al centro medio global de la ciudad como variables independientes y la cobertura urbana/poblada del año 2018 como variable dependiente, la regresión logística ejecutada muestra mayores probabilidades de crecimiento urbano/poblado tanto hacia el Este como al Oeste de la ciudad, al Oeste a lo largo de toda la margen Oeste del río Santa con cierta tendencia hacia el Norte de este sector; al Este las áreas con mayor crecimiento potencial se centralizan en y alrededor del área aluviónica con cierta tendencia hacia el Norte.

Para reforzar el análisis del crecimiento urbano potencial de la ciudad de Huaraz desde otra perspectiva, se ejecutó una Evaluación Multicriterio (EMC) al ser una técnica muy utilizada para analizar y decidir sobre el potencial del territorio para admitir nuevos equipamientos, para nuestro caso, nuevas zonas urbanas/pobladas. Se emplearon como factores, al igual que para la regresión logística, la distancia al centro medio global, la pendiente, la altitud. Se empleó también la densidad de puntos como factor que aporta información sobre la distribución de áreas urbanas/pobladas, se elaboró en base al modelo de cobertura urbana/poblada del año 2018. Cada factor fue estandarizado a un rango continuo de 0 a 255 donde 0 corresponde a un territorio con nula capacidad de acogida de nuevas áreas urbanas/pobladas y 255 con alta capacidad de acogida.

Cuadro 28. Estandarización continua (fuzzy) de los factores empleados para la EMC.

Criterio	Forma y tipo de la función	Máximo	Mínimo	Gráfico
Altitud	Sigmoidal monotónicamente decreciente	2997.00	3569.00	
Densidad de puntos	Sigmoidal monotónicamente creciente	0.00	49911.00	
Distancia al centro medio global	Sigmoidal monotónicamente decreciente	0.00	3950.88	
Pendiente	Sigmoidal monotónicamente decreciente	0.00	192.46	

Fuente. Elaborado por el autor

Se tomaron los siguientes supuestos para la ejecución de la EMC:

- A mayor altitud menor idoneidad del territorio para admitir áreas urbanas/pobladas.
- A mayor densidad de puntos mayor idoneidad del territorio para admitir áreas urbanas/pobladas.
- A mayor distancia respecto al centro medio global menor idoneidad del territorio para admitir áreas urbanas/pobladas.
- A mayor pendiente menor idoneidad del territorio para admitir áreas urbanas/pobladas.

Para todos los factores se empleó una función de tipo sigmoidal monotónicamente creciente o decreciente en función a su comportamiento con a la idoneidad del territorio.

Los resultados obtenidos fueron sometidos a una ponderación relativa empleando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), obteniendo los pesos relativos de cada factor y una razón de consistencia de 0.07 considerado aceptable (valor inferior a 0.1).

Cuadro 29. Ponderación de los factores mediante AHP

Factor	Altitud	Densidad	Distancia	Pendiente
Altitud	1	-----	-----	-----
Densidad	3	1	-----	-----
Distancia	5	3	1	-----
Pendiente	3	1/3	1/3	1

Fuente. Elaborado por el autor

Cuadro 30. Peso relativo de cada factor

Factor	Peso relativo
Altitud	0.0752
Densidad de puntos	0.2653
Distancia al centro medio global	0.5083
Pendiente	0.1512

Fuente. Elaborado por el autor

La EMC se ejecutó aplicando el método Weighted Linear Combination (WLC) en el que se tiene la máxima compensación entre los factores y un nivel medio de riesgo.

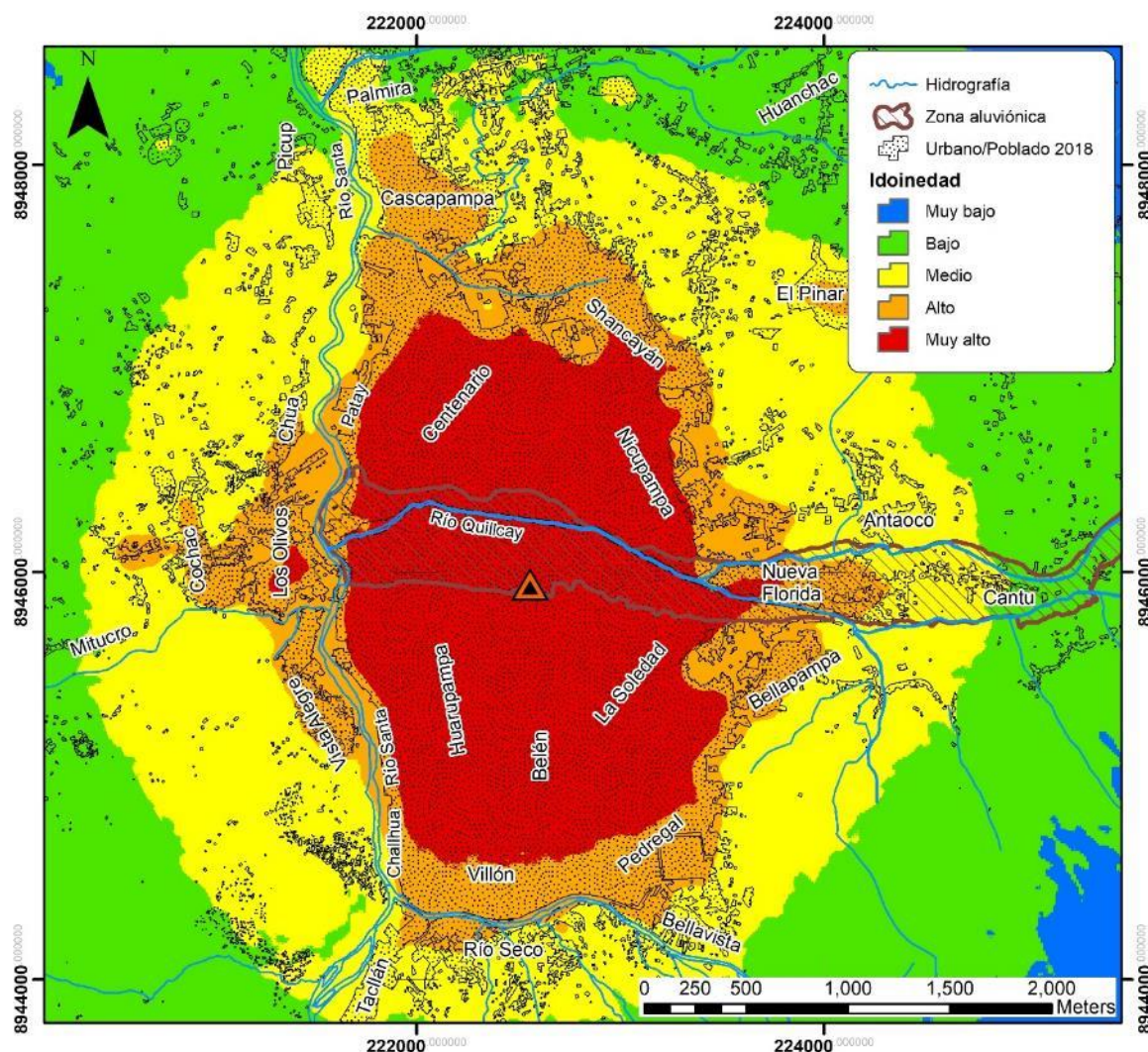


Figura 67. Distribución espacial de la idoneidad o potencial de acogida de nuevas áreas urbanas/pobladas en la zona de análisis. Elaborado por el autor.

De manera similar a los resultados obtenidos con la regresión logística, la distancia al centro medio global obtiene mayor peso relativo, seguida de la densidad de puntos, la pendiente y la altitud.

El 38% del área total de trabajo (54% excluyendo el área urbana del año 2018) corresponde a territorios con niveles de idoneidad o potencial bajo a muy bajo de acogida (valores entre 0 y 102 de la EMC). En estos territorios se evidencia el alto peso e influencia de la distancia al centro medio global, se encuentran alejados de este punto y alejados también de áreas urbanas/pobladas, aun cuando las pendientes y altitudes

puedan ser aparentes para admitir nuevas áreas urbanas/pobladas.

Cuadro 31. Distribución espacial de la idoneidad/potencial de admitir nuevas áreas urbanas/pobladas en la zona de análisis

Idoneidad/Potencial	Área (ha)	%
Urbano 2018	774.7	30.3%
Muy bajo	80.7	3.2%
Bajo	884.2	34.6%
Medio	699.5	27.3%
Alto	113.7	4.4%
Muy alto	5.6	0.2%
Total	2558.4	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

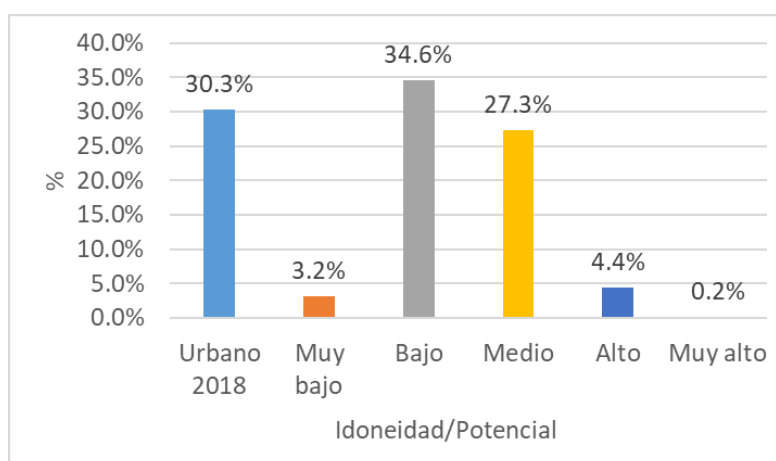


Figura 68. Distribución de la idoneidad/potencial de admitir nuevas áreas urbanas/pobladas en la zona de análisis. Elaborado por el autor.

Comprenden estos territorios áreas agropecuarias de subsistencia y reducidas áreas forestales de la zona rural alrededor de la ciudad de Huaraz a partir de aproximadamente 2,200 metros del centro medio global en sectores como Marián, Huanchac, Cantu, Rataquenua y Los Pinos al Este de la ciudad; al Oeste son áreas muy poco pobladas aguas arriba de sectores como Mitucro, Chua Alta, Pongor y Picup. 27% del área total de trabajo, o 700 ha, tienen un potencial medio de acogida (entre 103 y 154 de la EMC) de nuevas áreas urbanas/pobladas (39% del área total excluyendo la zona urbana/poblada del 2018), se

trata de áreas urbano marginales y rurales en franco crecimiento desde 1948, pero aun con actividades agropecuarias de subsistencia y forestales. Es una zona importante no sólo por su extensión sino también porque, en base a las actuales condiciones y tendencias de crecimiento observadas, constituirá a futuro la zona de mayor expansión urbana/poblada. Comprende las partes altas de los sectores de Nueva Florida, Nicrupampa, Shancayán y Cascapampa a Noreste de la ciudad; las partes altas de Pedregal, Bellavista, La Soledad y Bellapampa al Sureste. Al Sur las partes altas de Río Seco, al Oeste de la ciudad en las partes altas adyacentes a Vista Alegre, Cochac, Los Olivos, Chua y Picup.

Los territorios con potencial alto y muy alto (valores entre 154 y 256 de la EMC) de acogida de nuevas áreas urbanas/pobladas comprenden el 5% del área total de trabajo (7% excluyendo el área urbana/poblada correspondiente al año 2018), es decir 119 ha con clara predominancia del rango alto. Se trata de territorios muy influenciados por el área urbana actual y que en muchos casos forman parte de la dinámica socioeconómica de la ciudad, son áreas abiertas con mayores altitudes y pendientes que el núcleo histórico de la ciudad destinadas a cambiar a cobertura urbana en el corto plazo. Actualmente alberga algunas áreas agropecuarias de subsistencia, áreas abiertas asociadas a infraestructura educativa, turística, áreas descubiertas en proceso erosivo, infraestructura asociada a actividades automotrices y de transportes. Los sectores más representativos de esta clase se ubican en Antaoco, Nueva Florida y Bellapampa al Este de Huaraz; y Vista Alegre, Los Olivos, Cochac, Mitucro y Chua al Oeste.

Evidentemente los resultados de la regresión logística y la EMC varían significativamente, ambas metodologías enfocan el potencial crecimiento de la ciudad de Huaraz desde dos

perspectivas. La regresión logística es más restrictiva, produce resultados más ajustados a una relación estadística entre la zona urbana como variable dependiente y la distancia al centro medio global, la pendiente y la altitud extrapolando esta relación a la zona de análisis para determinar la probabilidad de albergar a futuro nuevas áreas urbanas/pobladas. La EMC no basa su análisis en una regresión estadística, sino en el análisis de un conjunto de criterios (para nuestro caso la distancia al centro medio global, la densidad de puntos en la zona urbana/poblada, la pendiente y la altitud) a los que se estandariza y asigna pesos relativos en función a su influencia particular en el establecimiento de nuevas áreas urbanas/pobladas para proceder a su integración aritmética y obtención de áreas con mayor o menor idoneidad o potencial relativo de acogida de nuevas áreas urbanas/pobladas, por ello sus resultados son más permisivos.

Precisamente, observar desde estos dos puntos de vista el crecimiento potencial de la ciudad de Huaraz en su conjunto y en la zona aluviónica en particular, permite enriquecer el análisis desde un escenario que podríamos definir uno como pesimista y otro como optimista. De la observación de ambos modelos podemos notar una importante coincidencia entre las altas probabilidades de la regresión logística (por encima de 0.6) y los altos a muy altos valores de idoneidad de la EMC en los sectores Oeste y Este de la ciudad en los sectores de Antaoco, Nueva Florida y Bellapampa, Vista Alegre, Los Olivos y Chua, Así como Tacllán al Sur. La divergencia entre los dos modelos resalta sobre todo en el nivel medio que es mucho más amplio en el resultado obtenido mediante la EMC y con una marcada influencia de la distancia al centro medio global, sin embargo, es importante señalar que las áreas con probabilidad media de alojar nuevas zonas urbanas/pobladas obtenidas mediante regresión logística están completamente contenidas dentro de

aquellas con idoneidad media obtenidas mediante la EMC. En base a lo observado en campo, podría ser factible considerar dentro de las áreas de probabilidad media inclusive aquellas con baja probabilidad en el modelo de regresión logística al estar también dentro del área con nivel medio de idoneidad en el modelo EMC.

Desde 1948 el crecimiento de la ciudad de Huaraz ha evolucionado hacia el norte con una ligera tendencia Noreste, esta tendencia continuará a juzgar por el crecimiento paulatino de las áreas rurales pobladas al norte de la zona de análisis en los últimos años, sin embargo, a futuro las áreas que experimentarán mayor crecimiento urbano se ubican a Oeste de la ciudad en los sectores de Vista Alegre, Los Olivos, Cochac, Chua y Picup; al Este en los sectores de Bellapampa, Nueva Florida y Antaoco. Lamentablemente, el crecimiento histórico de estos sectores desde 1948 ha dado lugar a la ocupación no planificada y precaria de territorios expuestos a peligros diversos entre ellos los de origen glaciar.

4.2. Riesgo por aluvión en la ciudad de Huaraz

4.2.1. Evolución de la exposición en la ciudad de Huaraz frente a un aluvión potencial de origen glaciar

Desde el aluvión ocurrido el año 1941 la ciudad de Huaraz ha crecido notoriamente ocupando paulatinamente el territorio afectado por el mencionado fenómeno, este territorio se ha denominado zona aluviónica. Es necesario señalar que, así como la ciudad ha crecido, el nivel de peligro también se ha incrementado notoriamente desde 1941 debido al acelerado crecimiento del área y volumen de la laguna Palcacocha, origen del peligro de aluvión, y a las actuales condiciones de cambio climático, glaciares colgantes, morrenas inestables y geodinámica interna (falla de la Cordillera Blanca) existentes en

su entorno. Por lo tanto, tal como se analizará en el apartado siguiente, la zona aluviónica no necesariamente coincide con el mapa de peligro frente a aluviones, sin embargo, es útil analizar cómo ha evolucionado la ocupación de áreas urbanas/pobladas en la zona aluviónica dentro del área de análisis y cuáles son sus perspectivas en base a los modelos de crecimiento urbano potencial obtenidos.

La zona aluviónica cubre una superficie de 139.8 ha en la zona de análisis. Se extiende en dirección Este - Oeste con origen en la laguna Palcacocha, recorre 24 km a lo largo de la quebrada Cojup en la subcuenca del río Quillcay, atraviesa la ciudad de Huaraz desembocando finalmente en el río Santa.

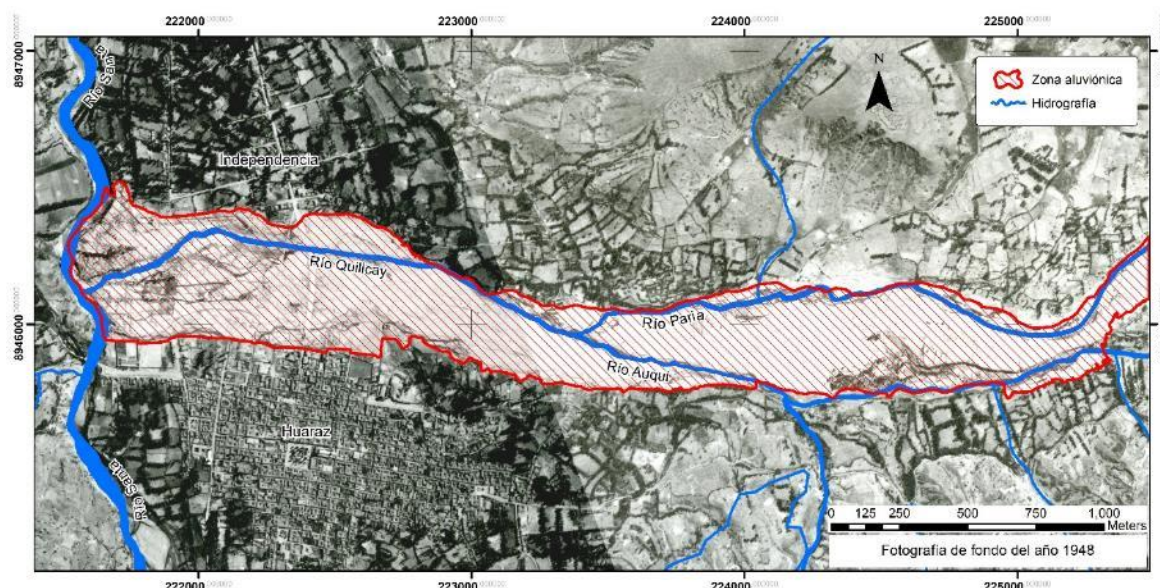


Figura 69. Zona aluviónica en la zona de análisis reconstruida en base a la fotografía aérea de 1948. Elaborado por el autor.

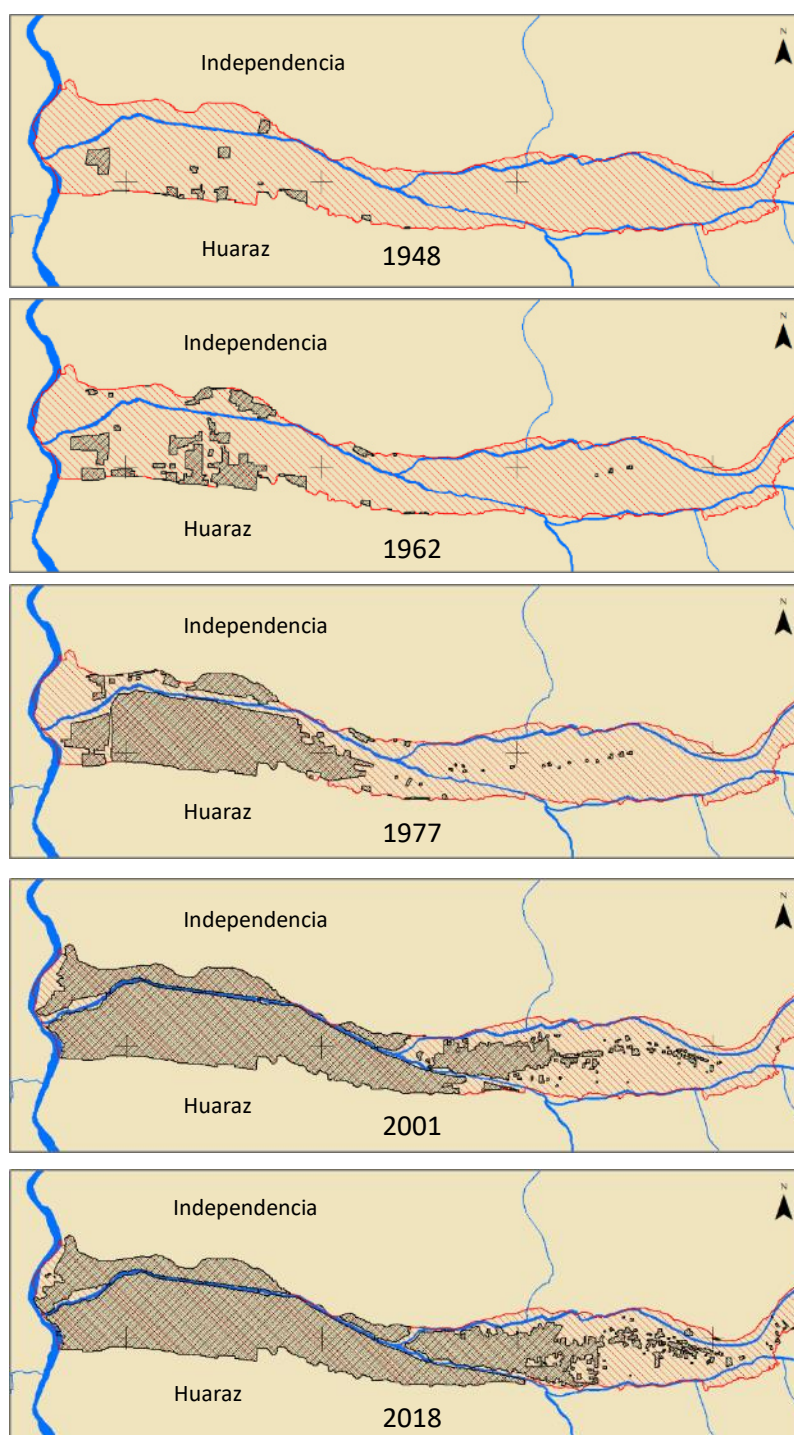


Figura 70. Evolución del área urbana/poblada en la zona aluviónica de la ciudad de Huaraz entre 1948 y 2018. Elaborado por el autor.

La zona aluviónica de la ciudad de Huaraz separa los distritos de Independencia y Huaraz, y es parte fundamental de la dinámica socioeconómica de la ciudad. Esta zona, como pasa en el resto de la ciudad ha experimentado un crecimiento urbano/poblado importante desde el año 1948, seis años después de ocurrido el aluvión. En 1948 la zona afectada por el

aluvión estaba prácticamente despoblada sólo con indicios de ocupaciones precarias temporales como algunos cercos abarcando 3.4 ha (3% del área urbana/poblada en 1948 y 3%% del área aluviónica), una vía de conexión y un puente precarios entre en núcleo histórico y el barrio de Centenario.

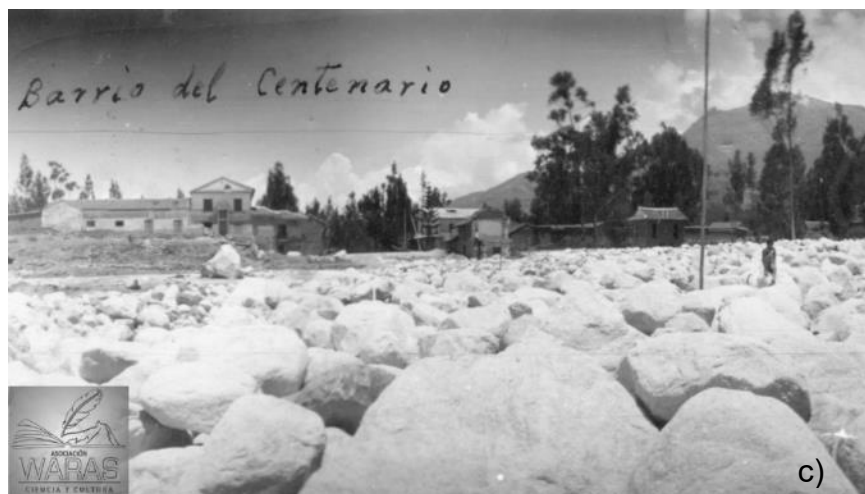


Figura 71. Zona aluviónica el año 1941. Obtenido de Asociación WARAS <http://www.pcca.org.pe/fototeca/show/10>

En 1962 en la zona aluviónica se observan amplias áreas cercadas y edificaciones nuevas de adobe totalizando un área de 13 ha, es decir el 8.3% del área urbana/poblada total en 1962 y el 9% del área aluviónica.

La zona aluviónica aledaña al núcleo histórico de la ciudad para el año 1977 se encuentra completamente cubierta con edificaciones concentradas y atomizadas mayoritariamente de adobe, sobre todo en la margen Sur del río Quilllcay. El área urbana/poblada en la zona aluviónica asciende a 46 ha, es decir, el 13% del área urbana total en 1977 y el 33% del área aluviónica total.

El año 2001 en área urbana/poblada en la zona aluviónica era de 82 ha es decir el 14% del área urbana/poblada total y el 59% del área aluviónica. En esta zona las edificaciones son de

diverso tipo desde material precario, adobe hasta modernas edificaciones de material noble de varios pisos, sin embargo, es notorio el desorden de su desarrollo y distribución existiendo áreas con edificaciones atomizadas y hacinadas en la que prospera la actividad comercial formal e informal.

En la zona aluviónica, el área urbana ocupa el año 2018, 93 ha el decir el 12% de la cobertura urbana total y el 66% de la zona aluviónica, es evidente la constante y creciente ocupación del área aluviónica en todo el período de análisis, siendo las nuevas áreas urbanizadas, de manera similar al año 2001, generalmente desordenadas y con sectores de ocupación precaria altamente vulnerables.

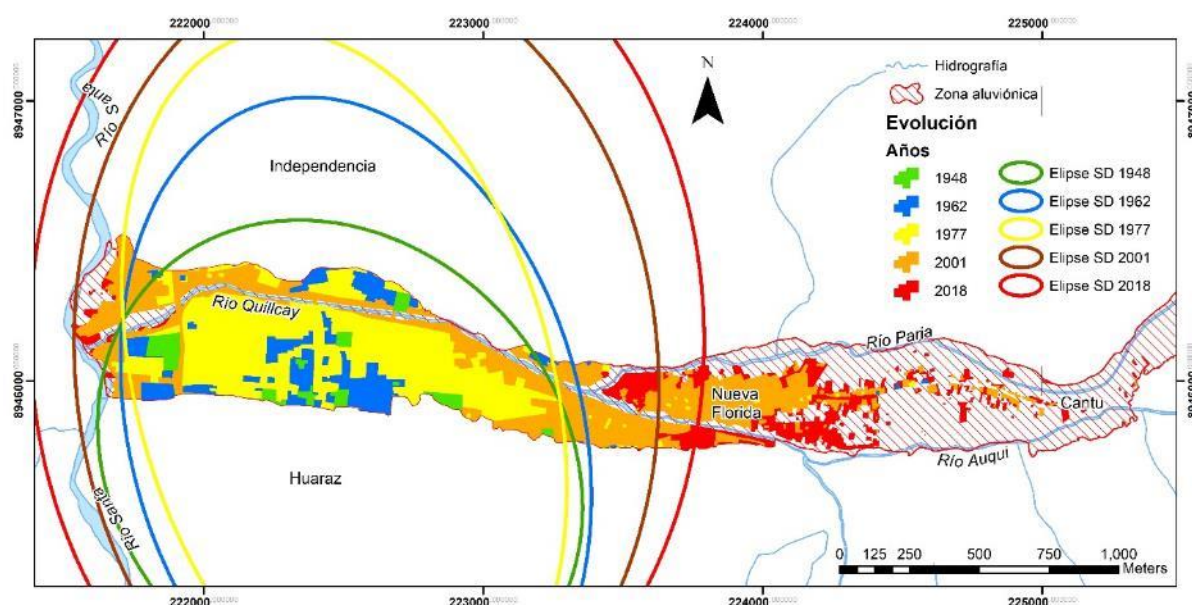


Figura 72. Evolución visual comparativa del área urbana/poblada en la zona aluviónica de la ciudad de Huaraz entre 1948 y 2018.
Elaborado por el autor.

En la zona aluviónica, el mayor incremento porcentual se observa en el período 1948-1962 con un 279%, sin embargo, es el período 1977-2001 el que muestra mayor incremento en área correspondiente a 36 ha (77% de incremento relativo) en coherencia con el alto incremento de zonas urbanas/pobladas que experimentó toda la ciudad de Huaraz en este mismo

período (249 ha). La tendencia de crecimiento porcentual de las áreas urbanas dentro de la zona aluviónica en el período de análisis ha ido paulatinamente decreciendo, alcanzando un mínimo el período 2001-2018, es decir, la velocidad de crecimiento urbano dentro del área aluviónica se ha ido ralentizando, sin embargo, el crecimiento en valores absolutos es positivo, la zona aluviónica se sigue poblando.

Analizando los polígonos de crecimiento urbano/poblado multitemporal en la zona aluviónica y las elipses de desviación estándar, es clara y constante la tendencia de ocupación hacia el Este en todo el período de análisis, sector correspondiente al barrio de Nueva Florida, pese a la tendencia global de crecimiento de la ciudad hacia el Norte con un ligero sesgo al Este, y a la mayor altitud y pendiente de estos territorios en relación al núcleo urbano.

Estos territorios, sin embargo, se encuentran no muy alejados del centro medio global (aproximadamente a 1 km) y están estrechamente conectados al núcleo urbano histórico a través vías pavimentadas, existen áreas que cuentan con servicios regulares de saneamiento básico y electrificación, sin embargo, existen también importantes áreas con construcciones precarias evidenciando un disloque entre la gestión de riesgos y la planificación urbana dando lugar a un crecimiento desordenado e informal y a una débil toma de conciencia de la población asentada en estos territorios. Es importante precisar también que hasta el final del período de análisis no se tenía implementado ningún sistema de alerta temprana u obra de seguridad que reduzca el nivel de riesgo en la ciudad de Huaraz, pese a ser de completo conocimiento y a estar en la agenda de gestión de las autoridades locales y regionales.

Cuadro 32. Evolución del área urbana/poblada en la zona aluviónica.

AÑO	AREA TOTAL (ha)	INCREMENTO		% ÁREA ALUVIÓNICA
		ha	%	
AÑO 1948	3.4			2.5%
AÑO 1962	13.1	9.6	279.1%	9.3%
AÑO 1977	46.3	33.2	254.7%	33.1%
AÑO 2001	82.1	35.8	77.2%	58.7%
AÑO 2018	92.9	10.8	13.2%	66.4%

Fuente. Elaborado por el autor

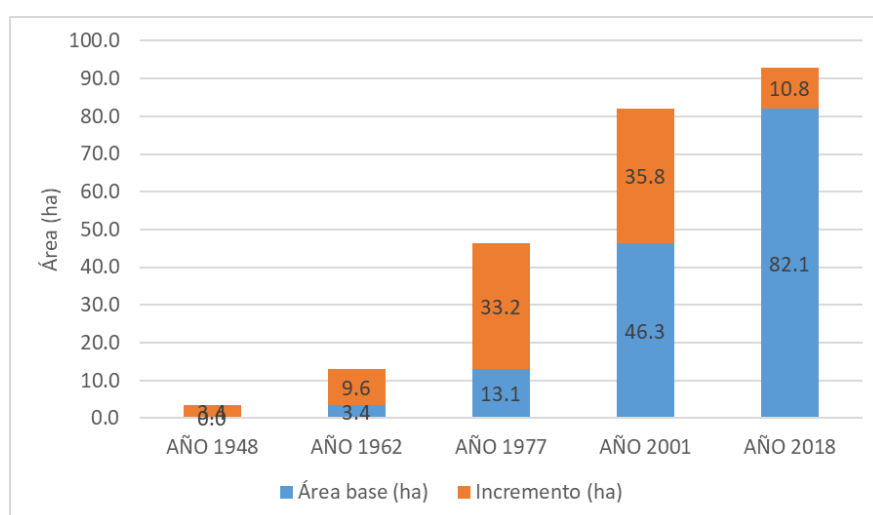


Figura 73. Evolución del área urbana/poblada zona aluviónica. Elaborado por el autor.

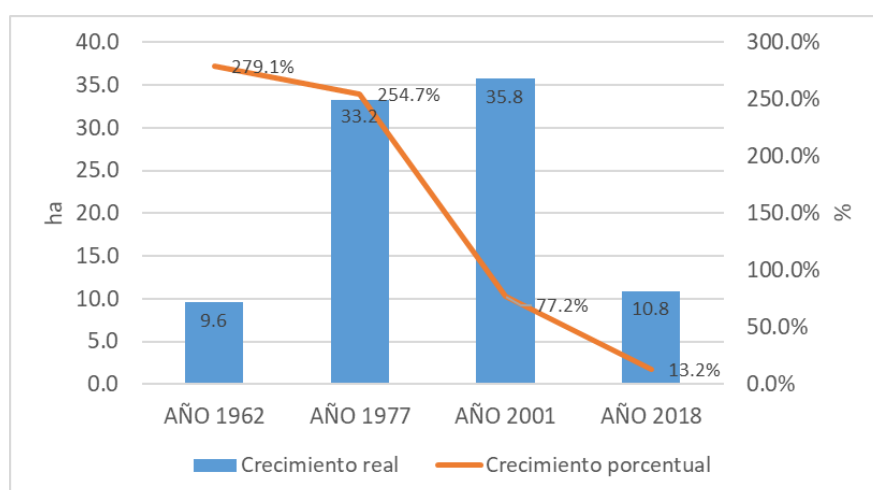


Figura 74. Crecimiento real y porcentual de la zona urbana/poblada en la zona aluviónica. Elaborado por el autor.

Con respecto a la probabilidad de crecimiento urbano mediante la regresión logística ejecutada en base a la cobertura urbana/poblada del año 2018 dentro de la zona aluviónica y descontando el área urbana de este año (92.9 ha o 66% de la zona aluviónica), la zona de crecimiento potencial se ubica en el sector Este de la zona aluviónica correspondiente al barrio de Nueva Florida. El 13% (18 ha) de la zona aluviónica presenta una probabilidad muy baja de ocupación correspondiente al sector de Cantu en el que se pueden apreciar para el 2018 algunas zonas pobladas dispersas. Por encima de la probabilidad de 0.2 se observan los territorios con mejores probabilidades de ocupación, en conjunto ocupan 29 ha (21% de la zona aluviónica) predominando en este grupo los territorios con probabilidades entre 0.2 a 0.4 con 9 ha (7% de la zona aluviónica), se trata de áreas periurbanas en franco crecimiento muy relacionadas con el núcleo urbano de la ciudad que cuenta con servicios básicos y vías pavimentadas.

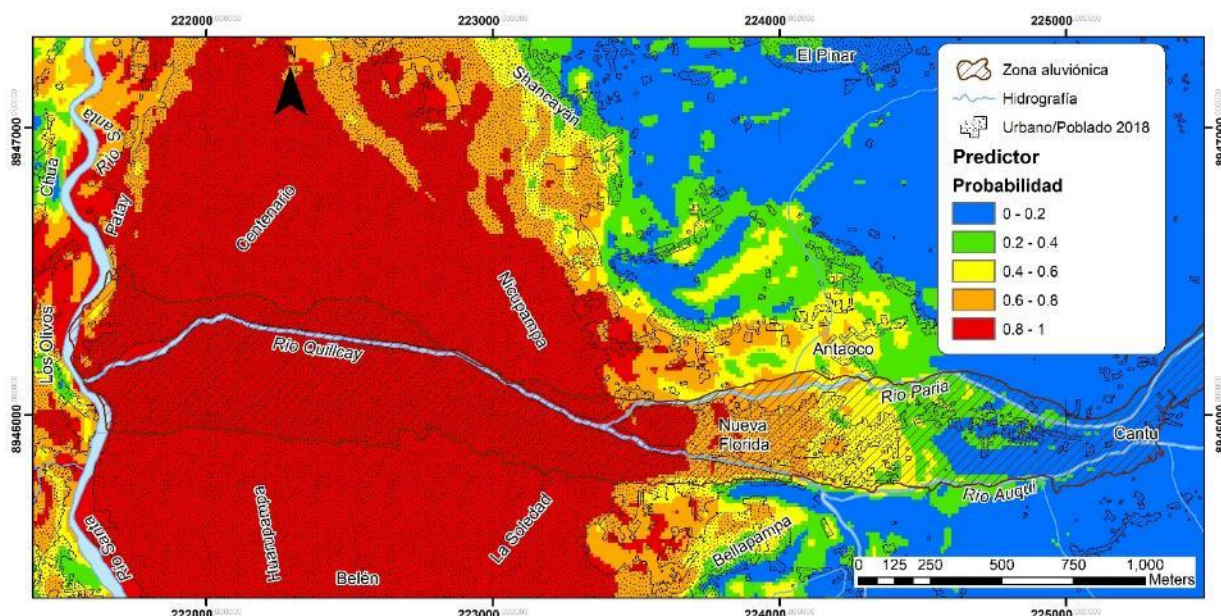


Figura 75. Probabilidad de crecimiento urbano en la zona aluviónica. Elaborado por el autor.

Cuadro 33. Distribución espacial de la probabilidad de crecimiento urbano en la zona aluviónica

Probabilidad	Área	%
Urbano 2018	92.9	66.4%
Prob. 0.0 - 0.2	18.3	13.1%
Prob. 0.2 - 0.4	9.0	6.5%
Prob. 0.4 - 0.6	6.8	4.9%
Prob. 0.6 - 0.8	6.0	4.3%
Prob. 0.8 - 1.0	6.9	4.9%
Total	139.8	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

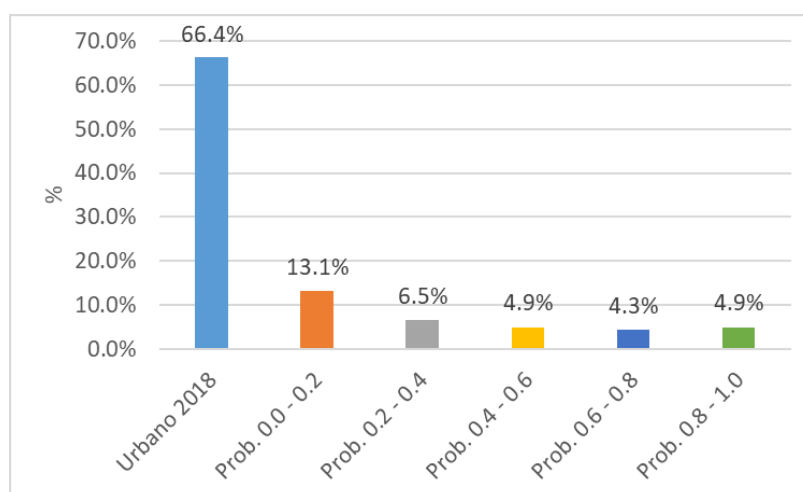


Figura 76. Distribución espacial de la probabilidad de crecimiento urbano en la zona aluviónica. Elaborado por el autor.

Desde otra perspectiva, los resultados menos restrictivos de la EMC-WLC muestran que el 10% (14 ha) de la zona aluviónica presenta un bajo potencial o idoneidad para admitir nuevas áreas urbanas, esta área corresponde al sector de Cantu en concordancia a los resultados de la regresión logística. Por encima de esta clase se tienen los territorios con potencial medio que ocupan el 15% de la zona aluviónica (21 ha) correspondientes al barrio de Nueva Florida actualmente en franco crecimiento. Los territorios pertenecientes a los niveles alto y muy alto poseen bajas extensiones dentro de la zona aluviónica, en conjunto ocupan el 23% (33 ha) por ello se considera que junto los territorios de nivel medio son los que prioritariamente serán poblados en el corto y mediano plazo en base a su potencial y a lo observado en campo.

Cuadro 34. Distribución espacial de la idoneidad/potencial de admitir nuevas áreas urbanas/pobladas en la zona de aluviónica

Idoneidad/Potencial	Área (ha)	%
Urbano 2018	92.9	66.4%
Bajo	14.2	10.1%
Medio	20.9	14.9%
Alto	7.5	5.4%
Muy alto	4.4	3.1%
Total	139.8	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

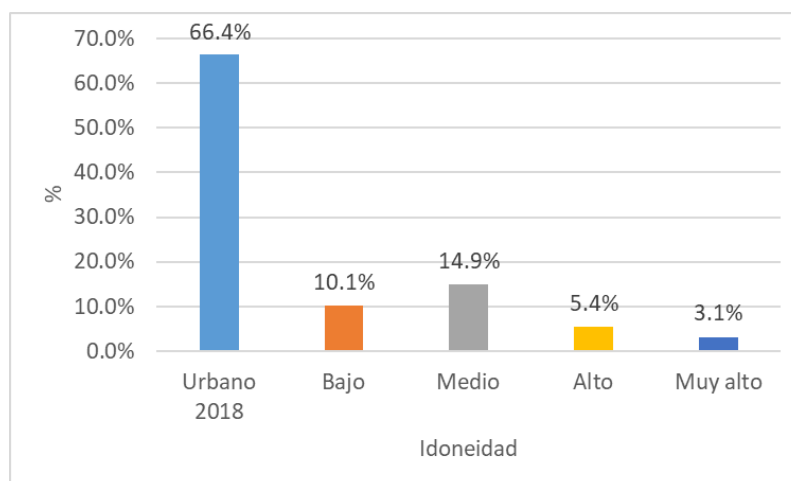


Figura 78. Distribución de la idoneidad/potencial de admitir nuevas áreas urbanas/pobladas en la zona aluviónica. Elaborado por el autor.

Pese a la reducción en la velocidad de crecimiento urbano en la zona aluviónica, esta continuará poblándose hacia el Este, el barrio de Nueva Florida, según los modelos, seguirá creciendo en el corto y mediano plazo hasta conectarse de manera continua con el sector de Cantu y ocupar el 34% que aún no tiene cobertura urbana/poblada en la zona aluviónica. La ratio de crecimiento anual promedio en los setenta años de análisis fue de 1.3 ha/año, siendo mayor en el período 1962 a 1977 con 2.2 ha/año y menor en el período 2001 a 2018 con 0.6 ha/año. Teniendo en cuenta la ratio promedio de crecimiento anual la zona aluviónica dentro del área de análisis podría estar poblándose en los próximos 37 años, incrementando la vulnerabilidad de la población que habita este territorio y sus medios de vida, pues el peligro latente que constituye la laguna Palcacocha aún no ha sido resuelto agravando este panorama el inexorable proceso de cambio climático existente.

Cuadro 35. Ratio anual de crecimiento de áreas urbanas/pobladas en la zona aluviónica.

Período	Incremento (ha)	Años	Ratio (ha/año)
1948-1962	9.6	14	0.7
1962-1977	33.2	15	2.2
1977-2001	35.8	24	1.5
2001-2018	10.8	17	0.6
Promedio			1.3

Fuente. Elaborado por el autor

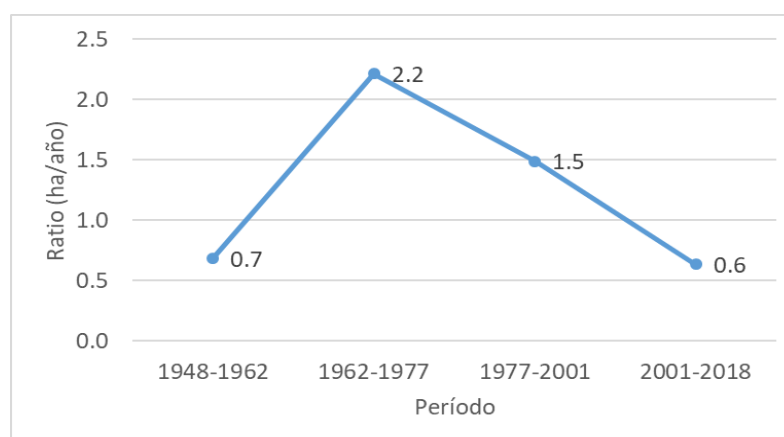


Figura 79. Evolución de la ratio anual de crecimiento de áreas urbanas/pobladas en la zona aluviónica. Elaborado por el autor.

4.2.2. Peligro por aluvión en la ciudad de Huaraz

En la presente investigación hemos hecho referencia a cuatro mapas de peligro de aluvión:

- Año 2003 – Mapa de peligros dentro de los que se considera el peligro de aluvión elaborado por INDECI como parte del proyecto Ciudades Sostenibles.
- Año 2004 – Mapa de vulnerabilidad en caso de aluvión, elaborado por la Municipalidad Provincial de Huaraz como parte del Catastro Urbano de la Ciudad de Huaraz.
- Año 2014 – Modelo de peligro de aluvión elaborado dentro de los proyectos HIMAP e IMACC Quillcay desarrollados por el MINAM, BID, la Universidad de Texas y el Instituto de Montaña.
- Año 2016 – Modelo de peligro de aluvión elaborado por las universidades de Texas y Zúrich como parte del proyecto Glaciares+ ejecutado por CARE PERÚ.

Es importante analizar cómo y por qué han ido evolucionando los mapas de peligro de aluvión de la laguna Palcacocha, así como sus características y consistencia, como indicadores del compromiso de los decisores locales en materia de gestión de riesgos.

El mapa del año 2003 elaborado por INDECI no sólo considera el peligro de aluvión de la laguna Palcacocha sino también otros como desbordes de ríos, sismos, derrumbes, deslizamientos, colmatación, erosión y asentamientos. No considera niveles de peligro, sólo muestra una zona a la que se categoriza como de peligro intenso de afectación destructiva, dentro de la zona de análisis, ocupa un área de 197 ha cuyo 62% coincide con la zona aluviónica, por otro lado, el 87% de la zona aluviónica se encuentra dentro del mapa de peligro del año 2003. El mapa

forma parte de un documento denominado Plan de Prevención Ante Desastres: Usos del Suelo y Medidas de Mitigación, formulado por la entidad rectora el año 2003 en materia de gestión de Riesgos, sin embargo, no fue empleada de manera formal como fuente de información para la gestión del territorio o riesgos en los siguientes años. Para su desarrollo efectuó un trabajo de campo de reconocimiento en lo que respecta al peligro de aluvión y no se emplearon técnicas computacionales en su desarrollo, se basó en la interpretación visual del relieve y los antecedentes aluviónicos en la zona.

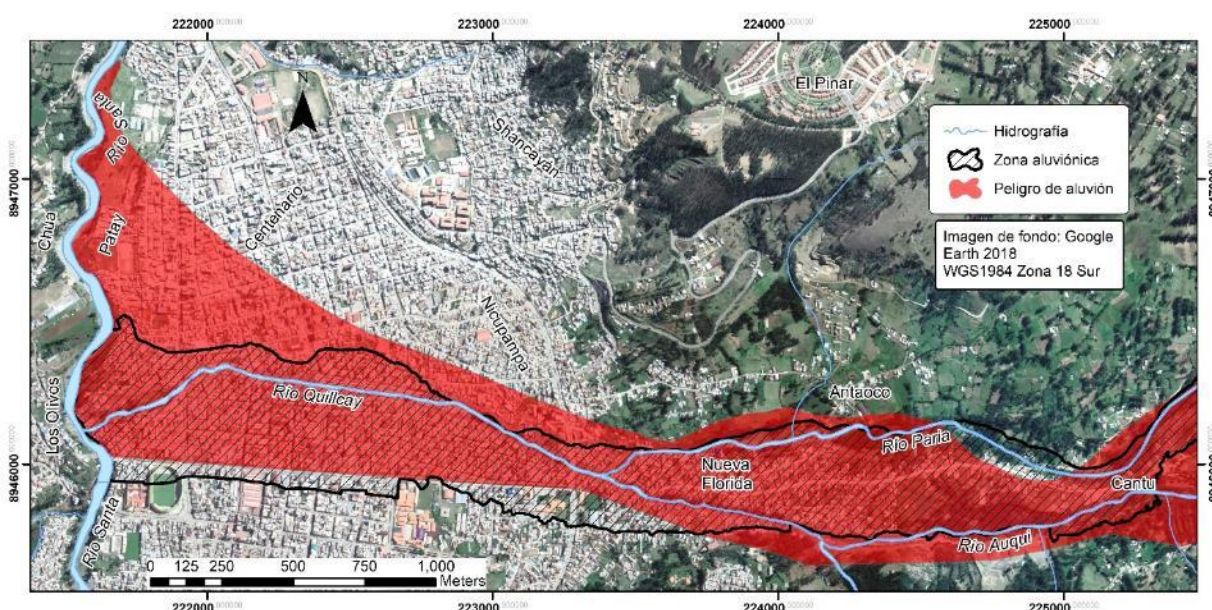


Figura 80. Mapa de peligro de aluvión elaborado por INDECI el año 2003. Elaborado por el autor.

El mapa de peligro de aluvión del año 2004 formulado por la Municipalidad Provincial de Huaraz como una de las capas de información temática que forma parte del catastro Urbano de la ciudad no tuvo en consideración el mapa de peligros de INDECI elaborado tan sólo un año antes, se puede evidenciar que no coinciden espacialmente en absoluto, esto es un claro indicador de la falta de articulación entre autoridades y entidades técnico científicas en materia de gestión de riesgos. El mapa presenta cuatro niveles de peligro que van de bajo a muy alto, para

nuestro análisis consideraremos sólo los niveles medio, alto y muy alto dentro de nuestra área de análisis los que en conjunto abarcan 551 ha, de ellas 130 ha coinciden con el área aluviónica (24%), por otro lado, el 94% del área aluviónica se encuentra dentro del mapa de peligro del año 2004 sobre todo dentro del nivel muy alto con el 92% el área aluviónica. Para la elaboración de este mapa sólo se realizó un reconocimiento de campo y la interpretación visual del relieve de la ciudad y zonas aledañas, no se empleó una metodología estandarizada por entidades rectoras en la materia, sin embargo, al ser parte de Catastro de la ciudad fue reconocido oficialmente por la Municipalidad Provincial de Huaraz, pero con un nivel de aplicación bajo.

Cuadro 36. Distribución espacial de los niveles de peligro del mapa elaborado por la Municipalidad Provincial de Huaraz el año 2004.

PELIGRO	Área (ha)	%
Bajo	1082.4	66.3%
Medio	270.8	16.6%
Alto	51.1	3.1%
Muy alto	228.8	14.0%
Total	1633.2	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

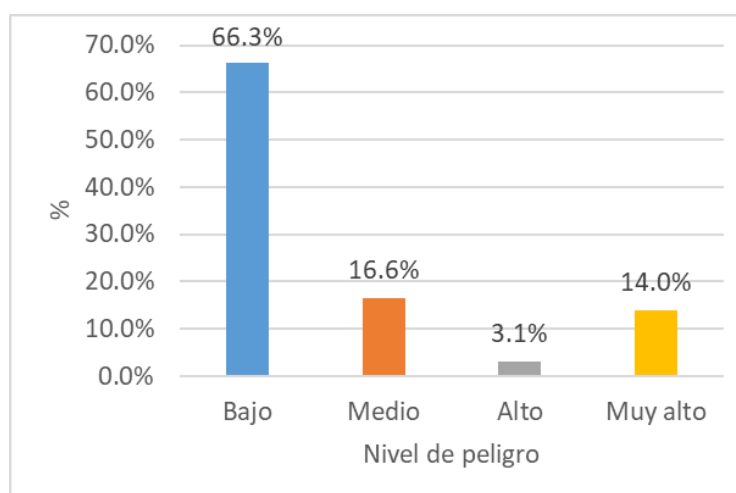


Figura 81. Distribución de los niveles de peligro del mapa elaborado por la Municipalidad Provincial de Huaraz el año 2004. Elaborado por el autor.

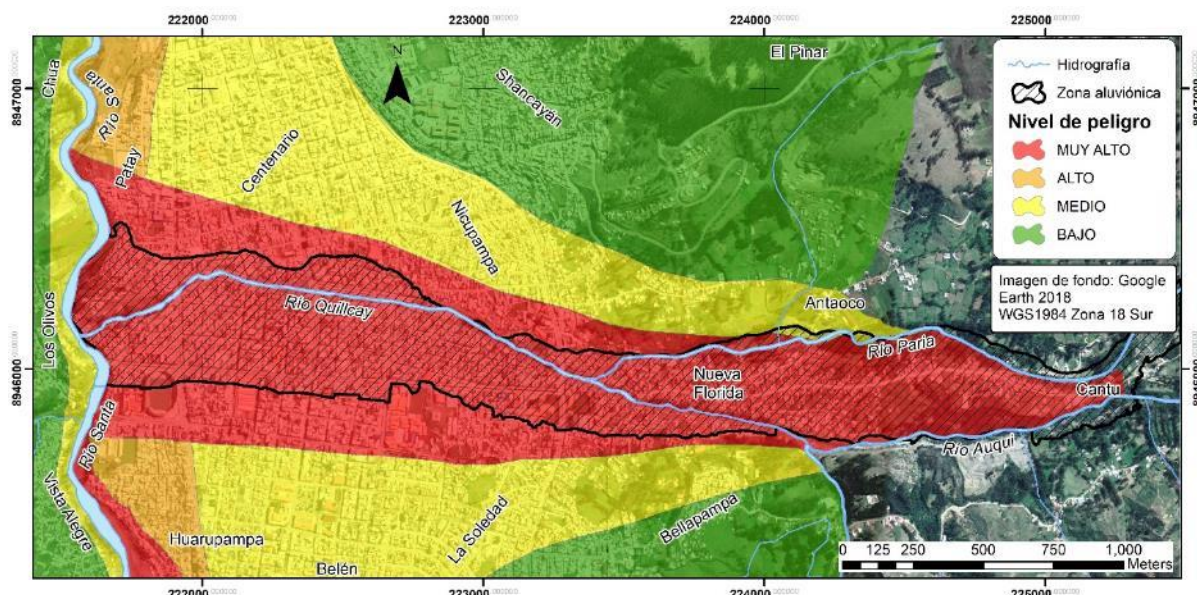


Figura 82. Corte del mapa de peligro de aluvión elaborado por la Municipalidad Provincial de Huaraz el año 2004. Elaborado por el autor.

El mapa de peligro de aluvión correspondiente al año 2014 elaborado por la universidad de Texas se realizó como parte de las acciones de los proyectos HIMAP e IMACC conducentes a la implementación de medidas de adaptación al cambio climático en la subcuenca del río Quillcay entre las que se identificó la necesidad de contar con un mapa de peligro elaborado en base a información cuantitativa y modelos computacionales, los mapas de los años 2003 y 2004 no fueron empleados como insumos para su elaboración. En el desarrollo del mapa se realizó trabajo de campo sistemático en la identificación de la cobertura del territorio y la obtención del índice de vegetación (NDVI) empleado en los cálculos computacionales; así como en la caracterización de la laguna, la morfología glaciar y de la quebrada Cojup y subcuencas de los ríos Paria y Quillcay.

Para la simulación del aluvión, previo al mapa de peligro, se empleó información satelital (LANDSAT) y fotografías aéreas ortorectificadas, un modelo de elevación digital de alta resolución, información hidrométrica y batimétrica de la laguna Palcacocha, información geológica sobre el dique morrénico. La información se procesó empleando programas especializados

en hidráulica y remoción de masas como FLO-2D, FLOW3D, RAMMS y MIKE-11. No se empleó una metodología estandarizada por las entidades rectoras nacionales para la obtención final del mapa de peligro al no existir una específica para aluviones, existiendo sólo el Manual Básico para la Estimación de Riesgo documento de carácter general elaborado por INDECI, por ello se adaptó una metodología de Venezuela que considera tres niveles de peligro: bajo, medio y alto. El mapa de peligro obtenido no logró finalmente un reconocimiento oficial de parte de las entidades locales y regionales pese a que fueron partícipes de su elaboración.

Cuadro 37. Distribución espacial de los niveles de peligro del mapa elaborado por el proyecto HIMAP - IMACC el año 2014.

PELIGRO	Área (ha)	%
Bajo	25.8	5.6%
Medio	27.3	5.9%
Alto	407.0	88.5%
Total	460.1	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

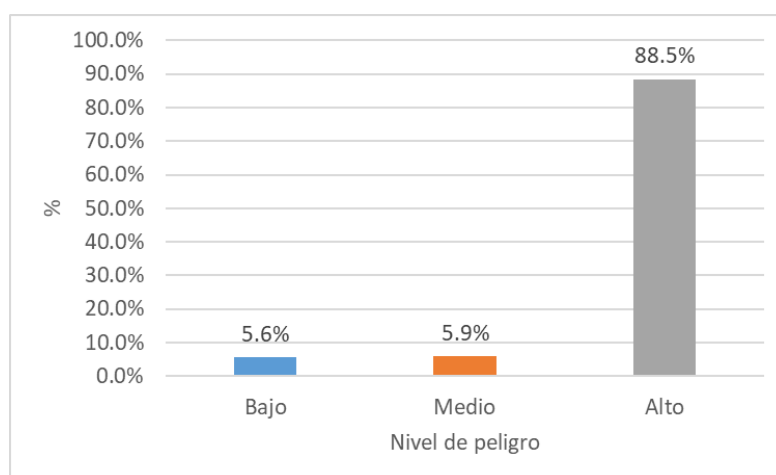


Figura 83. Distribución de los niveles de peligro del mapa elaborado por el proyecto HIMAP - IMACC el año 2014. Elaborado por el autor.

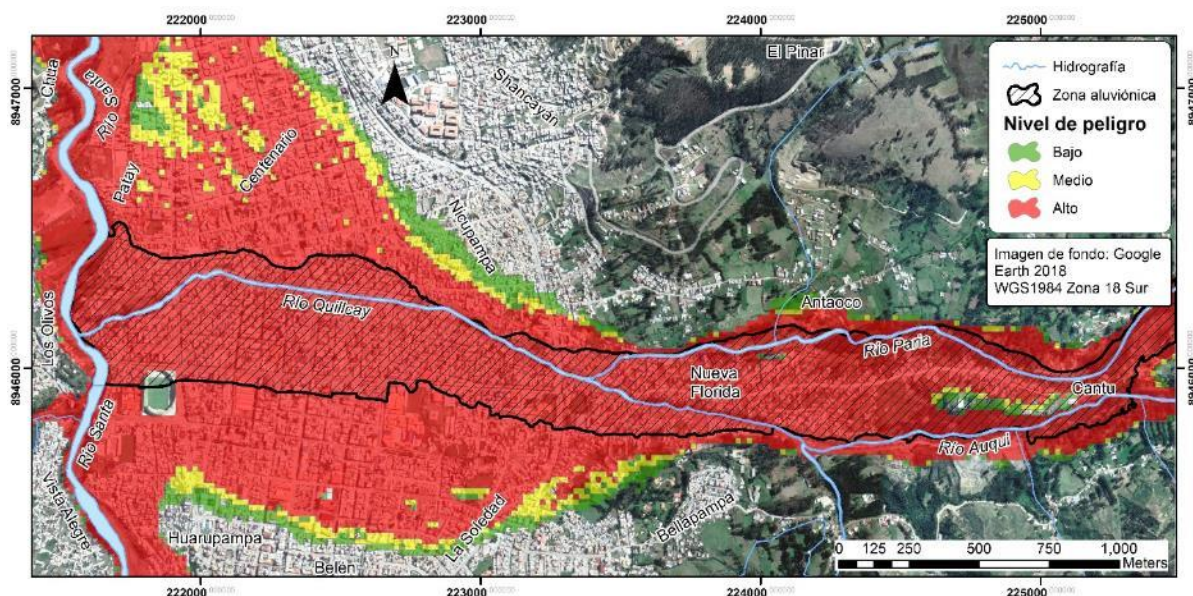


Figura 84. Corte del mapa de peligro de aluvión elaborado por el proyecto HIMAP - IMACC en año 2014. Elaborado por el autor.

El mapa de peligro del año 2014 se elaboró considerando únicamente el desborde de la laguna Palcacocha y la ruptura completa del dique, existe un escenario alternativo intermedio que considera una ruptura parcial, sin embargo, se optó por el escenario de mayor gravedad para fines de planificación y gestión de riesgos.

Dentro del área de análisis de la presente investigación la zona potencialmente afectada por un aluvión ocupa 460 ha, sin embargo, centramos nuestro análisis en los niveles de peligro medio y alto los que en conjunto ocupan 434 ha o el 94% del área total potencialmente afectada, el 32% de ésta área se encuentra dentro de la aluviónica. El 99% de la zona aluviónica se encuentra dentro de la potencial área afectada por un aluvión según el modelo realizado el año 2014 y el 97% corresponde a un nivel de peligro alto. Dadas las notorias diferencias entre las técnicas empleadas para la elaboración del presente mapa y aquellas empleadas para los años 2003 y 2004, los resultados son muy diferentes entre la zona con nivel de peligro alto de 2014 versus aquellas con niveles alto y muy alto el año 2004 sobre todo en el núcleo urbano de la ciudad, el

mapa del año 2014 presenta un área con alto peligro más extensa.

Como parte del proyecto Glaciares+ liderado por CARE PERU se planteó la necesidad de actualizar el mapa de peligro del año 2014 por parte de los especialistas de las universidades de Zúrich y Texas, ya que existía preocupación por la metodología empleada, la supuesta ruptura completa del dique y la existencia de otras lagunas en la cabecera de cuenca del río Quillcay que, si bien no revisten el mismo nivel de peligro que Palcacocha, podrían originar aluviones dependiendo del volumen de avalancha que impacte la laguna y el oleaje producido. El mapa de peligro de aluvión del año 2016 por lo tanto, se basa en un aluvión potencial producido por el desborde de tres lagunas Palcacocha, Tullparaju y Cuchillacocha, en relación al dique de Palcacocha, se corrieron modelos que muestran que no se produciría una brecha o ruptura, por lo que el nivel de volumen del aluvión potencial es mucho menor en comparación con el modelo del año 2014. Otro aspecto importante fue la publicación al año 2015 del Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales por parte de CENEPRED, documento oficial empleado para formular el mapa de peligro a partir del modelo de aluvión, con cuatro niveles que van de bajo a muy alto.

Para la realización del mapa de peligros del 2016 se empleó información y técnicas similares a las empleadas el año 2014, se empleó modelamiento numérico computacional y programas especializados (se adicionó BASEMENT para el análisis de la brecha en el dique), también se realizó trabajo de campo sistemático para la verificación de datos de relieve, geológicos y de cobertura del territorio. Los resultados obtenidos fueron finalmente reconocidos por las autoridades locales y regionales elaborándose y publicándose finalmente el mapa de peligro

frente a aluviones de la ciudad de Huaraz vigente que ha sido empleado en la elaboración de instrumentos de gestión de riesgos en la ciudad.

Dentro del área de análisis la zona afectada por un aluvión potencial según el modelo corrido el 2016 tiene un área de 495 ha, 367 ha corresponden a niveles de peligro entre medio y muy alto, es decir el 74% del área total potencialmente afectada. El 38% de las zonas con peligro entre medio a muy alto pertenecen a la zona aluviónica, la cual, a su vez se encuentra completamente comprendida dentro del área potencialmente afectada por el modelo de aluvión del 2016 entre los niveles medio a muy alto predominando con un 81% el nivel muy alto.

Cuadro 38. Distribución espacial de los niveles de peligro del mapa elaborado por el proyecto GLACIARES+ el año 2016.

PELIGRO	Área (ha)	%
Bajo	127.8	25.8%
Medio	121.5	24.6%
Alto	74.7	15.1%
Muy alto	170.9	34.5%
Total	494.9	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

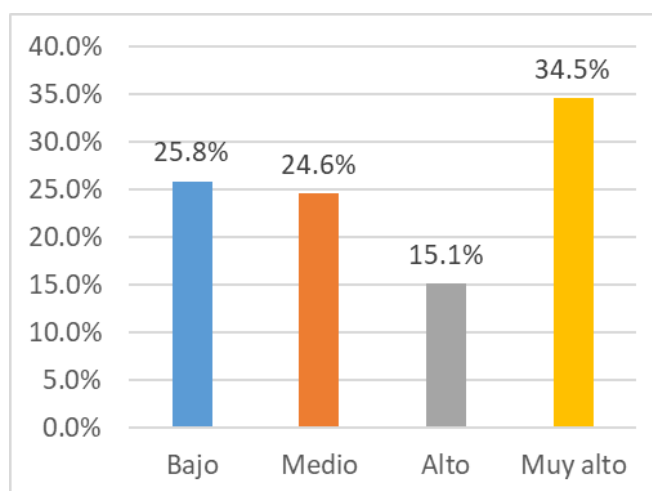


Figura 85. Distribución de los niveles de peligro del mapa elaborado por el proyecto GLACIARES+ el año 2016. Elaborado por el autor.

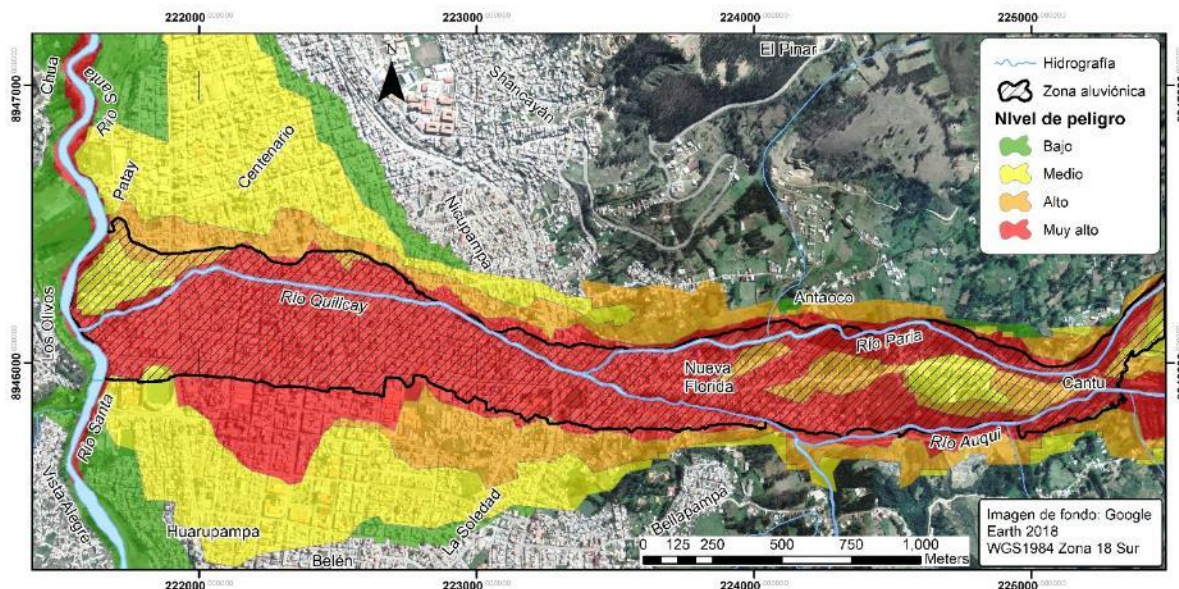


Figura 86. Corte del mapa de peligro de aluvión elaborado por el proyecto GLACIARES+ el año 2016. Elaborado por el autor.

La diferencia entre los mapas de peligro del 2014 y 2016 es notoria sobre todo en el área de alto nivel de peligro pese a la similitud de la información y metodología empleadas. La diferencia radica en la ruptura o formación de la brecha en el dique morrénico de la laguna Palcacocha, el año 2014 se modeló asumiendo una ruptura completa del dique, el 2016 se determina que no habría ruptura, este aspecto fue hasta el 2018 materia de discusión técnica pues no se tenía información detallada sobre las características de estabilidad del dique por debajo del nivel de la base de la laguna frente a la acción de un aluvión potencial.

De la evolución de los mapas de peligro desde el año 2003 se puede concluir que el nivel de complejidad en el modelamiento del aluvión potencial se fue incrementando, corrigiendo o mejorando en el camino aspectos técnico científicos que permitieron reducir la subjetividad en la obtención de los resultados con el uso de programas especializados e información de alta resolución topográfica, hidrológica, geológica y sobre la cobertura del territorio. Esta mejora viene acompañada de la participación de especialistas de universidades como Zúrich y Texas como parte de las

actividades de los proyectos HIMAP-IMACC y GLACIARES+ que, si bien desarrollaron sus acciones de manera coordinada con el gobierno local y regional, no fueron iniciativa de éstos.

Cuadro 39. Resumen de los aspectos de interés de los mapas de peligro frente a aluvión en la ciudad de Huaraz.

Criterio	INDECI 2003	M.P. Huaraz 2004	HIMAP 2014	Glaciares+ 2016
Ajuste zona aluviónica	87%	94%	99%	100%
Control de campo	Reconocimiento	Reconocimiento	Sistemático	Sistemático
Información	Relieve	Relieve	DEM, geología, Hidrología, batimetría, Imágenes satelitales, ortofotografías	DEM, geología, Hidrología, batimetría, Imágenes satelitales
Técnica	Interpretación visual	Interpretación visual	Modelamiento numérico, empleo de programas especializados de remoción de masas e hidráulica	Modelamiento numérico, empleo de programas especializados de remoción de masas e hidráulica
Metodología oficial	Sí – INDECI	No	No	Sí - CENEPRED
Reconocimiento oficial/aplicación	No	Sí	No	Sí

Fuente. Elaborado por el autor

Los mapas de peligro de los años 2003, 2004 y 2014 no fueron empleados de manera decisiva como base para la planificación urbana y la gestión de riesgos, este hecho sumado al crecimiento de la ciudad de Huaraz ocupando casi completamente la zona aluviónica demuestra que la atención a los riesgos existentes en la ciudad no fue prioridad de las autoridades. Si bien existían avances, hasta el año 2018 no se tenía implementado ni el sistema de alerta temprana ni las obras de seguridad en la laguna Palcacocha después de muchos años en los que entidades como la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua, el INAIGEM y expertos en glaciología venían advirtiendo sobre el peligro

existente. Los resultados obtenidos a través de la participación de las entidades científicas mencionadas revelan también las limitaciones existentes a nivel de las entidades técnico científicas locales y regionales, aspecto sobre el que entidades como la Universidad de Zúrich y el proyecto GLACIARES+ aportaron al capacitar al personal de las entidades locales y regionales mediante cursos, diplomados y pasantías.

Desde que el aluvión originado en la laguna Palcacocha ocurrió el 13 de diciembre de 1941, su volumen se fue incrementando constantemente llegando a más de 17 millones de metros cúbicos el año 2016, este es el principal factor de peligro de aluvión que, por lo tanto, no ha sido constante, el nivel de peligro se ha ido incrementando en directa proporción al incremento del volumen de la laguna agravando el problema el actual proceso de cambio climático que viene desestabilizando los glaciares tropicales. Pese a lo antes señalado no es sino hasta el año 2003 que se cuenta con un mapa inicial de peligro como parte de un estudio técnico elaborado por una entidad competente (INDECI) y hasta el 2014-2016 que se cuenta con un mapa de peligro elaborado con técnicas computacionales que ofrecen resultados más confiables y reconocidos por las autoridades locales y regionales.

4.2.3. Evolución del riesgo por aluvión en la ciudad de Huaraz

Desde 1941 la ciudad de Huaraz ha crecido continuamente ocupando áreas expuestas a un potencial aluvión originado en la laguna Palcacocha cuyo volumen también se ha incrementado en el período en investigación por lo que el nivel de peligro no ha sido constante. El mapa de peligro vigente elaborado el año 2016 no corresponde por lo tanto a los períodos iniciales de esta investigación entre los años 1948 hasta antes del 2001 en los que el volumen de la laguna era menor, el año 1974 la laguna

tuvo 514,800 m³, el año 2009 llegó a 17'325,207 m³ y el año 2016 su volumen se midió en 17'403,353 m³.

No se cuenta con mapas de peligro de aluvión del nivel de los elaborados los años 2014 y 2016 para períodos previos en los que las condiciones de la laguna eran diferentes, sin embargo, es importante destacar que la zona aluviónica se encuentra comprendida casi en su totalidad en las zonas de peligro de aluvión de todos los mapas analizados, sobre todo en los correspondientes a los años 2014 y 2016, predominando claramente los niveles de peligro alto y muy alto (97% y 81% respectivamente), por lo tanto, la zona aluviónica puede ser considerada una zona de alto nivel de peligro frente a un potencial aluvión de la laguna Palcacocha empleándose para analizar la evolución del riesgo para los años 1977, 1962 y 1948 (aspecto analizado en el apartado 4.2 sobre la evolución de la exposición de la ciudad de Huaraz frente a un aluvión potencial de origen glaciar); para los años 2001 y 2018, así como para los modelos prospectivos, se empleó el mapa de peligro del año 2016 aún vigente.

Analizando la evolución de las elipses de desviación estándar y de los centros promedio entre los años 1948 y 2018, la tendencia histórica de crecimiento urbano general de la ciudad de Huaraz se da hacia el Norte con un ligero sesgo hacia el Este, hecho refrendado por el análisis de dirección de crecimiento de la ciudad con respecto a su centro medio global, sin embargo, específicamente en la zona aluviónica el crecimiento ha sido continuo hacia el Este ocupando paulatinamente el área afectada por el aluvión de 1941 hasta llegar a cubrir el 66% de su extensión el año 2018.

En relación al mapa de peligro de aluvión del año 2016, la tendencia de crecimiento de las zonas urbanas/pobladas y la

ocupación de la zona aluviónica demuestran haber favorecido al incremento de la exposición frente a un aluvión potencial en el eje Sur-Norte con respecto al centro medio global. Se observa que la zona aluviónica, los barrios de Centenario y Patay que tuvieron un crecimiento importante entre 1948 y 1977, para el año 2018 se encuentran expuestos a niveles importantes de peligro que varían de medio a muy alto, correspondiéndoles estos mismos niveles de riesgo.

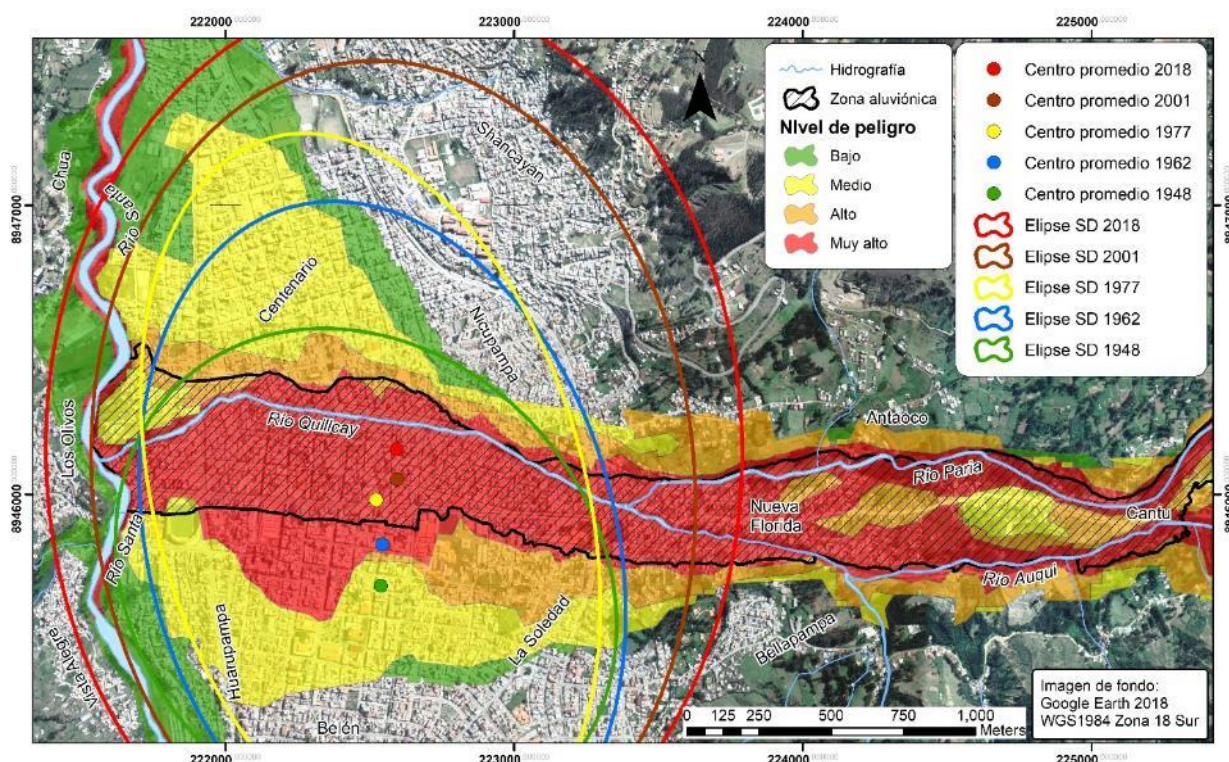


Figura 87. Evolución de los indicadores de dirección de crecimiento urbano en relación al mapa de peligro de aluvión del año 2016. Elaborado por el autor.

Posteriormente a la ocurrencia del aluvión en 1941 hasta 1977 la zona aluviónica constituye el área de máximo nivel de peligro frente a aluviones en la ciudad de Huaraz, las áreas expuestas con fueron creciendo con un alto nivel de riesgo, en 1948 ocupaban sólo el 3% de la zona aluviónica, así como el 3% del área urbana/poblada total para este año (111 ha).

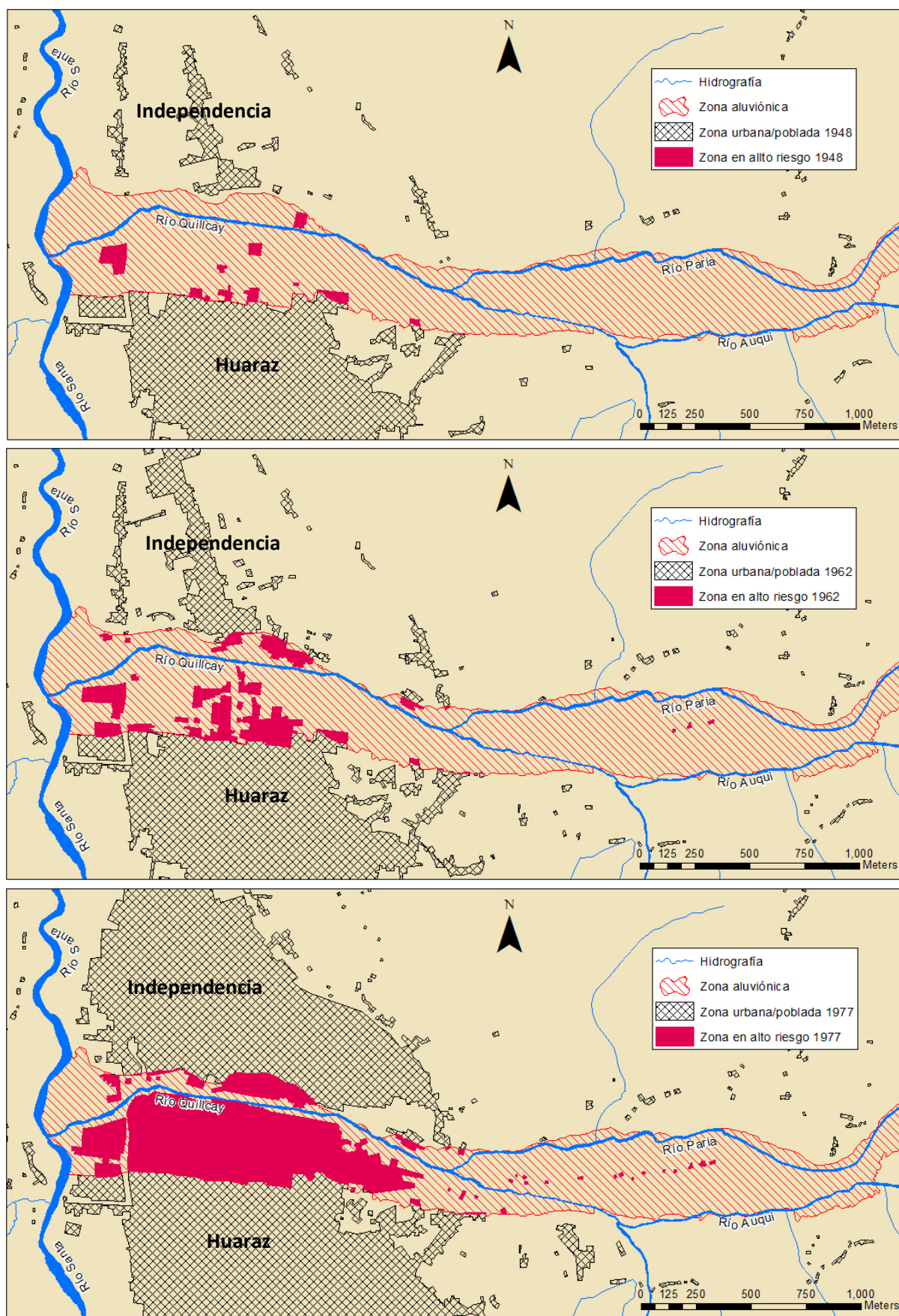


Figura 88. Evolución de las áreas con alto nivel de riesgo entre 1948 y 1977. Elaborado por el autor.

Cuadro 40. Áreas con alto nivel de riesgo en la ciudad de Huaraz entre 1948 y 1977

AÑO	AREA TOTAL (ha)	INCREMENTO		% ÁREA ALUVIÓNICA
		ha	%	
AÑO 1948	3.4			2.5%
AÑO 1962	13.1	9.6	279.1%	9.3%
AÑO 1977	46.3	33.2	254.7%	33.1%

Fuente. Elaborado por el autor

En 1962 las zonas de alto nivel de riesgo ocuparon el 9% de la zona aluviónica y el 8% del área urbana poblada para este año (158 ha). Para el año 1977 el 33% de la zona aluviónica está ocupada por áreas con alto nivel de riesgo correspondiente también al 14% del área urbana de este año (339.5 ha).

Para los años 2001 y 2018 los niveles de riesgo son los mayores del período de investigación debido al incremento del volumen de la laguna Palcacocha y al incremento de la exposición de áreas urbanas/pobladas por el crecimiento urbano. El año 2001, 298 ha de la zona urbana o poblada de la ciudad de Huaraz presenta algún nivel de riesgo frente a aluviones, de las cuales 234 ha (79% del área total en riesgo y 40% del área urbana/poblada total) presentan un nivel de riesgo considerable, es decir de medio a muy alto, predominando las áreas con nivel de riesgo medio con un 35% del total ubicadas en los barrios de Centenario, Patay, Nicrupampa en el distrito de independencia y Rosas Pampa, Huarupampa y La Soledad en el distrito de Huaraz. Los niveles de riesgo alto y muy alto se ubican asociados a la zona aluviónica predominando las áreas con muy alto nivel de riesgo con el 32% del área total para el 2001 comprendiendo pocas áreas de los barrios de Nicrupampa y Centenario; y áreas importantes en los barrios de Rosas Pampa, Huarupampa, La Soledad y Nueva Florida, barrio inexistente en los escenarios de 1977, 1962 y 1948. El 51% del área

urbana/poblada total para el año 2001 posee algún nivel de riesgo y el 22% niveles de riesgo alto o muy alto.

Para el año 2018 las condiciones de riesgo varían ligeramente, 332 ha presentan algún nivel de riesgo, es decir 12% más que el año 2001 en promedio, sin embargo, las áreas que experimentaron mayor crecimiento son las de nivel de riesgo bajo con 26% de incremento hecho que se explica en la dirección predominante de crecimiento de la ciudad en sentido Sur - Norte con un ligero sesgo al Este. Del área total en riesgo 252 ha poseen niveles de riesgo importante, es decir, entre medio a muy alto correspondiente al 76% del área total en peligro predominando y al 33% de la zona urbana total. En el período 2001 al 2018, el incremento de las áreas con niveles de riesgo alto o muy alto fue de 26% explicado por el crecimiento de las áreas urbanas/pobladas en la zona aluviónica específicamente en los barrios de Nueva Florida y Antaoco al Este de la ciudad de Huaraz. Para el año 2018 el 43% del área urbana/poblada de Huaraz presentaba algún nivel de riesgo y el 19% presentó niveles de riesgo alto o muy alto evidenciando que entre el año 2001 y 2018 la ciudad ha crecido en áreas menos expuestas a peligro de aluvión, sin embargo, específicamente en la zona aluviónica el crecimiento es acelerado incrementando notoriamente las áreas con alto nivel de riesgo.

Cuadro 41. Distribución espacial de los niveles de riesgo en la ciudad de Huaraz entre 2001 y 2018

Nivel de riesgo	2001		2018		Incremento 2001-2018
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	
Bajo	63.5	21.3%	80.5	24.2%	26.8%
Medio	103.9	34.9%	106.8	32.1%	2.7%
Alto	34.9	11.7%	40.8	12.3%	16.7%
Muy alto	95.2	32.0%	104.3	31.4%	9.6%
Total	297.5	100.0%	332.4	100.0%	11.7%

Fuente. Elaborado por el autor

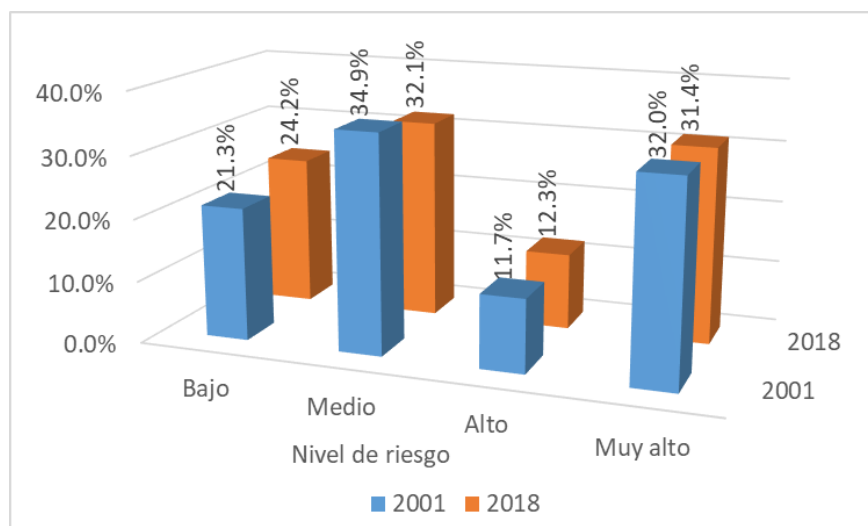


Figura 89. Niveles de riesgo en la ciudad de Huaraz entre 2001 y 2018. Elaborado por el autor.

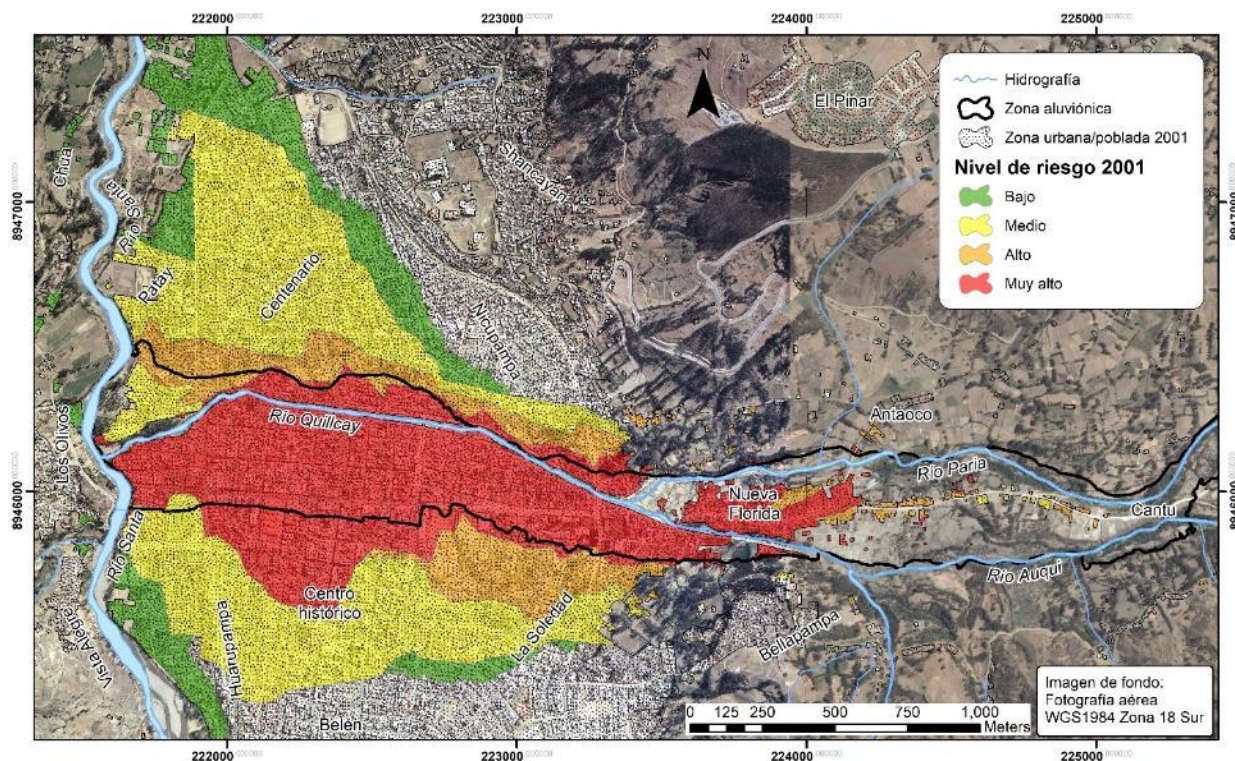


Figura 90. Mapa de riesgo frente a aluviones para el año 2001. Elaborado por el autor.

Desde 1941 la ciudad de Huaraz creció continuamente, paralelamente las condiciones de peligro de aluvión con origen en la laguna Palcacocha se incrementaron en la medida en que su volumen se incrementaba también. Sobre este segundo aspecto, el incremento del nivel de peligro, era muy difícil actuar para reducir de alguna manera el incremento del volumen de Palcacocha dadas las condiciones agrestes de su entorno, sin embargo, en 1974 la Unidad de Glaciología y Seguridad de Lagunas de Electro Perú S.A. construyó un dique artificial que mismo que resultó superado en su capacidad de contención debido al severo incremento del nivel de la laguna los años siguientes no habiéndose implementado ninguna obra de seguridad hasta el final del período de investigación el año 2018.

Por otro lado, la ocupación creciente de áreas expuestas al peligro de aluvión con niveles muy altos de riesgo evidencia la falta de gestión de riesgos y planificación urbana por parte de la

autoridades locales y regionales. Un total de 37 gestiones municipales provinciales pasaron desde 1941 sin que planificara o implementara un crecimiento urbano con criterio de gestión de riesgos en la zona aluviónica y áreas con niveles de riesgo importantes en la ciudad de Huaraz. Las áreas con altos niveles de riesgo frente a aluviones han crecido en el pasado y seguirán creciendo en los próximos años, según los resultados obtenidos en la presente investigación demostrándose que existe un grave disloque entre los tomadores de decisión sobre la gestión del territorio y las entidades técnicas y académicas.

Los resultados anteriores nos permiten conocer cómo evolucionó el riesgo por exposición en la ciudad de Huaraz, sin embargo, para fines de planificación resulta útil realizar un análisis prospectivo del riesgo de la ciudad frente a un aluvión potencial, análisis que se obtiene al integrar los escenarios de crecimiento urbano tendencial y potencial mostrados por los modelos de regresión logística y la Evaluación Multicriterio, de esta integración se obtiene que un total de 163 ha corresponde a áreas con algún nivel de peligro y con alguna probabilidad de crecimiento o potencial de acogida, excluyendo las áreas urbanas/pobladas del año 2018, el 71% de ésta área está expuesta a niveles de peligro importantes (de medio a muy alto) predominando el nivel de peligro muy alto con el 41% del total.

Para determinar los niveles de riesgo en cuatro escalas correspondiente al escenario prospectivo en base al modelo de regresión logística de crecimiento urbano de la ciudad, se empleó el siguiente cuadro que explica los criterios de clasificación.

Cuadro 42. Criterios de clasificación de los niveles de riesgo en base al modelo de regresión logística

Nivel de riesgo	Descripción
Bajo	Corresponde a áreas con nivel de peligro de aluvión bajo y cualquier nivel probabilidad de crecimiento urbano, o áreas con nivel de peligro de aluvión medio y muy baja probabilidad (0 a 0.2) de crecimiento urbano
Medio	Corresponde a áreas con nivel medio de peligro de aluvión y probabilidad de crecimiento urbano de superior a 0.2, o áreas con nivel de peligro de aluvión alto y probabilidad de crecimiento urbano muy baja (0 a 0.2)
Alto	Corresponde a áreas con nivel alto de peligro de aluvión y probabilidad de crecimiento urbano de superior a 0.2, o áreas con nivel de peligro de aluvión muy alto y probabilidad de crecimiento urbano muy baja (0 a 0.2)
Muy alto	Son áreas con nivel de peligro de aluvión muy alto y probabilidad de crecimiento urbano de superior a 0.2

Fuente. Elaborado por el autor

El escenario prospectivo de riesgo obtenido en base al modelo de regresión logística muestra que el 50% (81 ha) del área de expansión urbana potencial presenta niveles alto o muy alto, predominando las áreas de riesgo muy alto con el 30% del total.

Cuadro 43. Cruce de criterios para la clasificación de los niveles de riesgo prospectivo en base al modelo de regresión logística

Nivel de peligro	Probabilidad de crecimiento urbano - áreas (ha)										Total (ha)	%
	0.0 a 0.2	%	0.2 a 0.4	%	0.4 a 0.6	%	0.6 a 0.8	%	0.8 a 1.0	%		
Bajo	5.6	3.4%	5.7	3.5%	6.4	3.9%	15.5	9.5%	14.0	8.6%	47.2	29.1%
Medio	7.0	4.3%	1.9	1.2%	0.2	0.1%	2.6	1.6%	3.1	1.9%	14.8	9.1%
Alto	19.1	11.8%	3.7	2.3%	4.1	2.5%	5.8	3.6%	1.2	0.8%	34.0	20.9%
Muy alto	17.2	10.6%	13.2	8.1%	12.2	7.5%	11.1	6.9%	12.8	7.9%	66.5	40.9%
Total (ha)	48.9	30.1%	24.5	15.1%	22.8	14.0%	35.1	21.6%	31.1	19.2%	162.5	100.0%

	Nivel de riesgo bajo
	Nivel de riesgo medio
	Nivel de riesgo alto
	Nivel de riesgo muy alto

Fuente. Elaborado por el autor

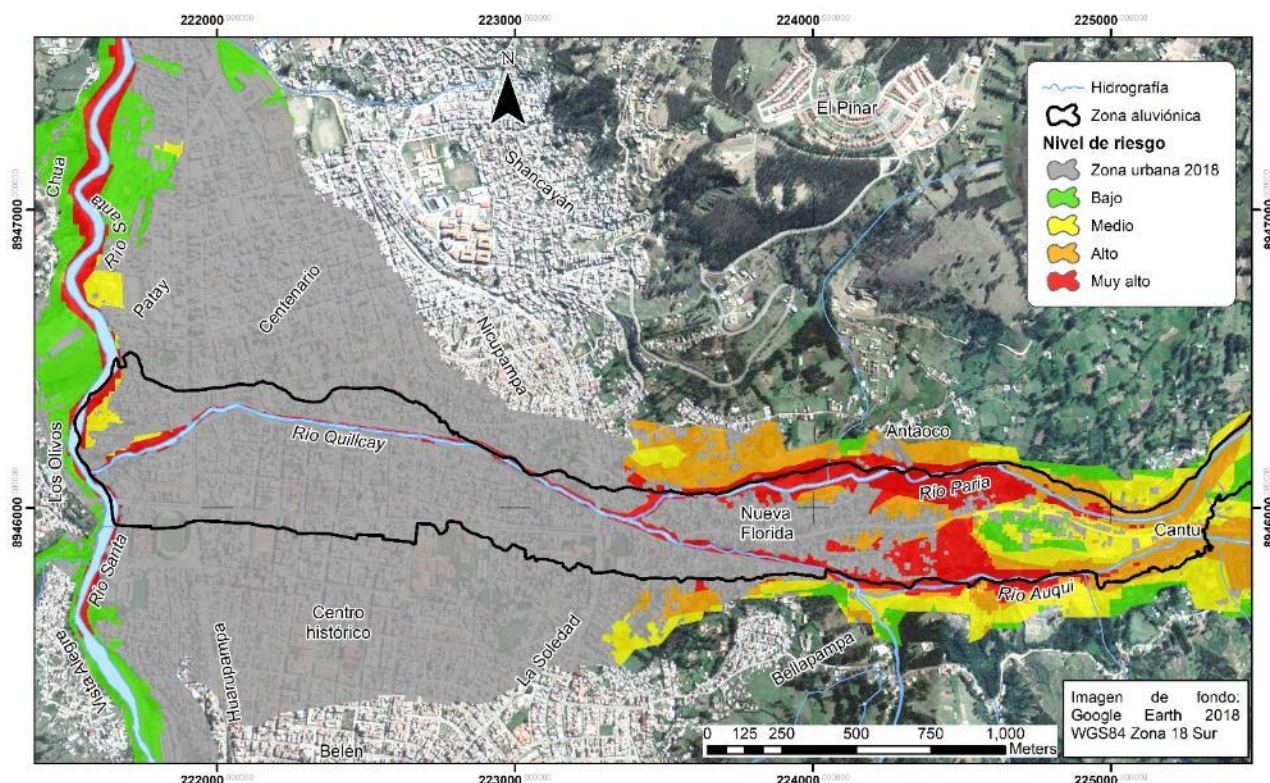


Figura 92. Mapa prospectivo de riesgo frente a aluviones en base al modelo de regresión logística. Elaborado por el autor.

Cuadro 44. Riesgo prospectivo de aluvión en base al modelo de regresión logística

Nivel de riesgo	Área (ha)	%
Bajo	54.2	33.3%
Medio	27.0	16.6%
Alto	32.1	19.7%
Muy alto	49.3	30.4%
Total	162.5	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

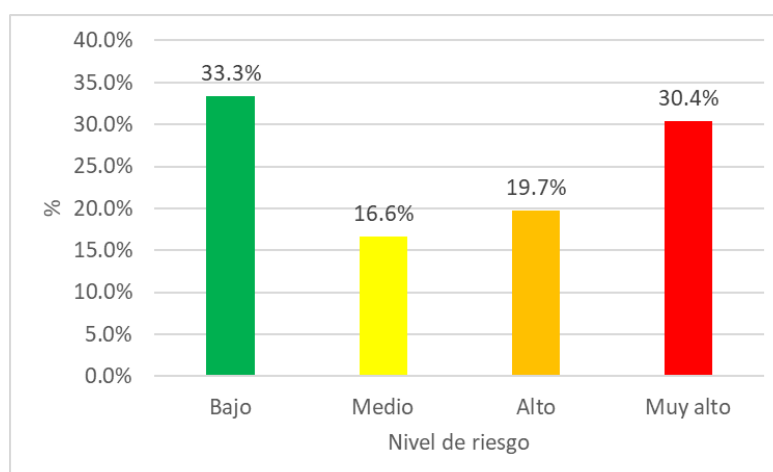


Figura 93. Distribución de áreas del modelo de riesgo prospectivo de aluvión en base al modelo de regresión logística. Elaborado por el autor.

A fin de determinar los niveles de riesgo en cuatro escalas correspondiente al escenario prospectivo en base al modelo de potencial de acogida de nuevas áreas urbanas/pobladas obtenido mediante Evaluación Multicriterio, se empleó el siguiente cuadro que explica los criterios de clasificación.

Cuadro 45. Criterios de clasificación de los niveles de riesgo en base al modelo de potencial de acogida de nuevas áreas urbanas/pobladas





Nivel de riesgo	Descripción
Bajo	Corresponde a áreas con nivel de peligro de aluvión bajo y cualquier nivel de potencial de acogida de nuevas áreas urbanas, o áreas con nivel de peligro de aluvión medio y bajo potencial de acogida de nuevas áreas urbanas.
Medio	Son áreas con nivel de peligro de aluvión medio y nivel de potencial de acogida de nuevas áreas urbanas medio, alto o muy alto; o áreas con nivel de peligro de aluvión alto y bajo potencial de acogida de nuevas áreas urbanas.
Alto	Son áreas con nivel de peligro de aluvión alto y nivel de potencial de acogida de nuevas áreas urbanas medio, alto o muy alto; o áreas con nivel de peligro de aluvión muy alto y bajo potencial de acogida de nuevas áreas urbanas.
Muy alto	Corresponde a áreas con nivel de peligro de aluvión muy alto y nivel de potencial de acogida de nuevas áreas urbanas medio, alto o muy alto

Fuente. Elaborado por el autor

El escenario de riesgo potencial obtenido a partir del modelo de potencial de acogida muestra que 54% (87 ha) del área total en riesgo corresponde a áreas con niveles de riesgo alto o muy alto predominando el riesgo muy alto con 31% del área total, este resultado guarda alta coherencia con los resultados de riesgo prospectivo obtenidos a partir de la regresión logística inclusive en las zonas con riesgo medio que ocupan el 15% (24 ha) del área en riesgo.

Cuadro 46. Cruce de criterios para la clasificación de los niveles de riesgo prospectivo en base al modelo de potencial de acogida

Nivel de peligro	Potencial de acogida de nuevas áreas urbanas - áreas (ha)								Total	%
	Bajo	%	Medio	%	Alto	%	Muy alto	%		
Bajo	5.1	3.1%	17.0	10.4%	25.1	15.5%	0.1	0.0%	47.2	29.1%
Medio	3.5	2.2%	5.2	3.2%	5.9	3.6%	0.2	0.1%	14.8	9.1%
Alto	12.7	7.8%	12.7	7.8%	8.4	5.2%	0.2	0.1%	34.0	20.9%
Muy alto	16.9	10.4%	32.7	20.1%	12.4	7.6%	4.5	2.8%	66.5	40.9%
Total (ha)	38.2	23.5%	67.5	41.6%	51.8	31.9%	5.0	3.1%	162.5	100.0%

 Nivel de riesgo bajo
 Nivel de riesgo medio
 Nivel de riesgo alto
 Nivel de riesgo muy alto

Fuente. Elaborado por el autor

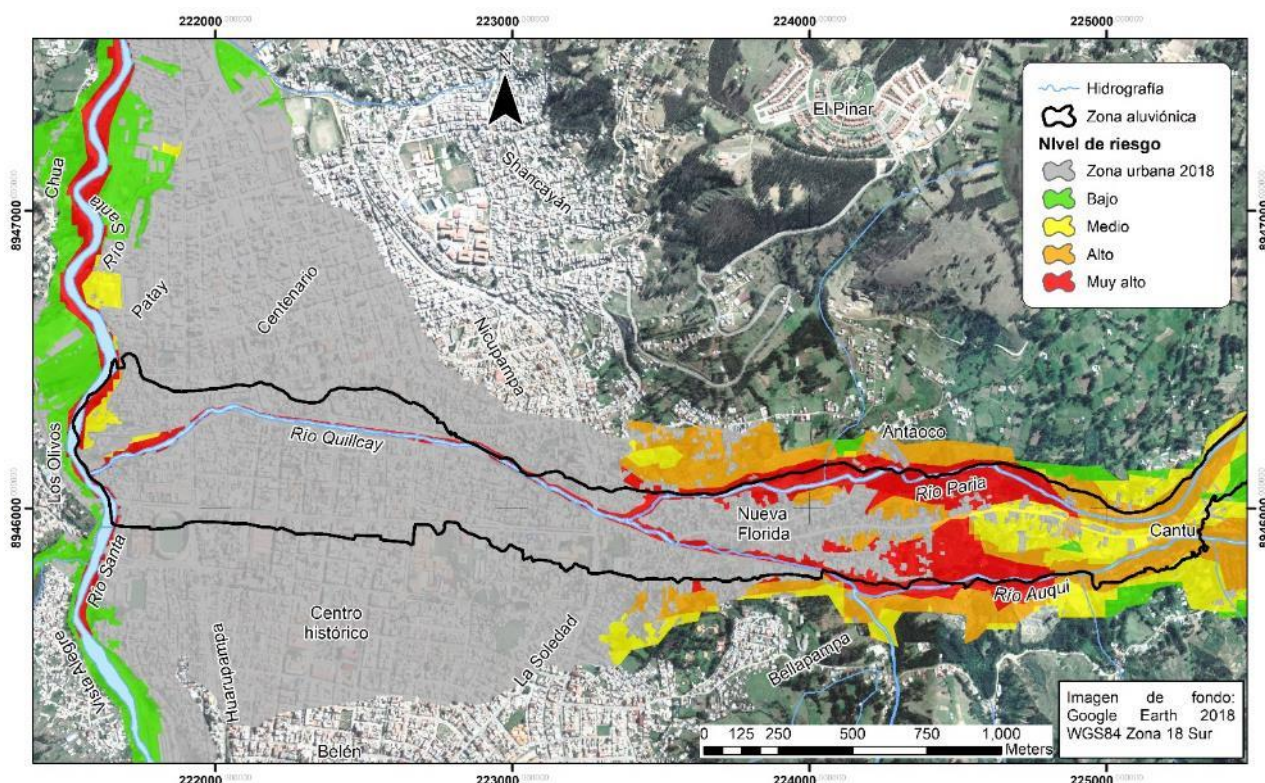


Figura 94. Mapa prospectivo de riesgo frente a aluviones en base al modelo de potencial de acogida. Elaborado por el autor.

Cuadro 47. Riesgo prospectivo de aluvión en base al modelo de potencial de acogida

Nivel de riesgo	Área (ha)	%
Bajo	50.7	31.2%
Medio	23.9	14.7%
Alto	38.2	23.5%
Muy alto	49.6	30.5%
Total	162.5	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

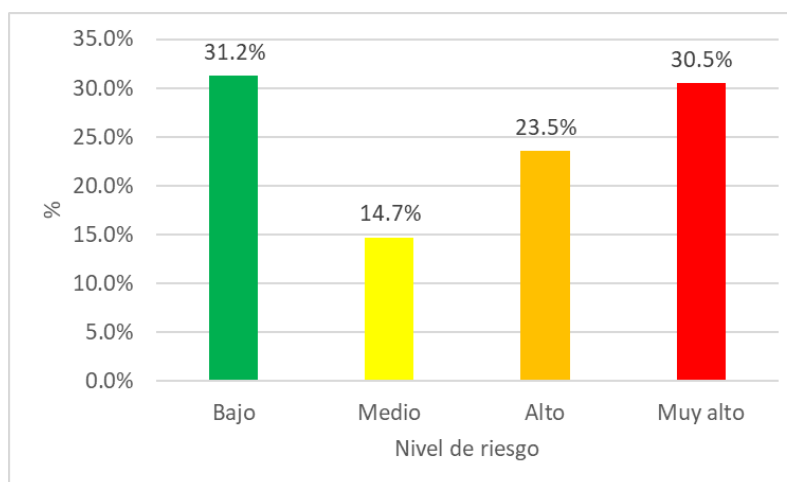


Figura 95. Distribución de áreas del modelo de riesgo prospectivo de aluvión en base al modelo de potencial de acogida. Elaborado por el autor.

Se tienen dos escenarios de riesgo prospectivo obtenidos a partir de dos enfoques: la probabilidad de crecimiento de zonas urbanas/pobladas y la capacidad de acogida, para fines de toma de decisiones es necesario contar con un mapa de riesgo prospectivo integrado que resuma los anteriores, el que se elaborará teniendo como criterio el peor escenario, es decir, se reclasificará a cada área asignándole el mayor nivel de riesgo que resulte de la intersección de ambos escenarios.

Dada la alta similitud espacial de los mapas de riesgo parciales el resultado de la integración es también muy similar a los anteriores. El mapa de riesgo prospectivo integrado muestra que 54% (88 ha) del área expuesta al peligro de aluviones, excluyendo la zona urbana correspondiente al año 2018, posee niveles de riesgo alto o muy alto, resultado similar al mapa de

peligro obtenido en base a la capacidad de acogida, sin embargo, se observa un ligero incremento en las áreas con nivel de riesgo muy alto que ocupan 53 ha (32%), con respecto a ambos mapas de peligro parciales, este nivel es el predominante. El área con nivel de riesgo integrado medio asciende a 24 ha (15%).

Como resultado de este análisis prospectivo, las áreas con niveles de riesgo alto y muy alto están ubicadas en plena zona aluviónica abarcando sectores de los barrios de Cantu, Nueva Florida y Antaoco en el distrito de Independencia; y Bellapampa en el distrito de Huaraz, también se ubican algunas áreas con muy alto nivel de riesgo en una franja adyacente a los ríos Santa y Quillcay. Para el año 2018 estas áreas ubicadas al Este de la ciudad eran de uso agrícola y pecuario, con algunas zonas forestales con especies exóticas (eucalipto), y se encontraban conectadas continuamente al núcleo de la ciudad de Huaraz mediante vías asphaltadas y afirmadas.

Se espera, en coherencia a la forma de crecimiento de la zona urbana/poblada observada, que el crecimiento urbano en las zonas de riesgo aún no pobladas carezca de planificación, con sistemas constructivos precarios (autoconstrucción incluso con material rústico o esteras) pero con acceso a servicios como energía eléctrica y con mayores limitaciones a agua y saneamiento. Aun cuando las franjas deben ser consideradas áreas intangibles, se observa que ha sido paulatinamente ocupadas esperándose que en los próximos años continúe este proceso en las franjas marginales de los ríos Santa y Quillcay con nivel de riesgo muy alto.

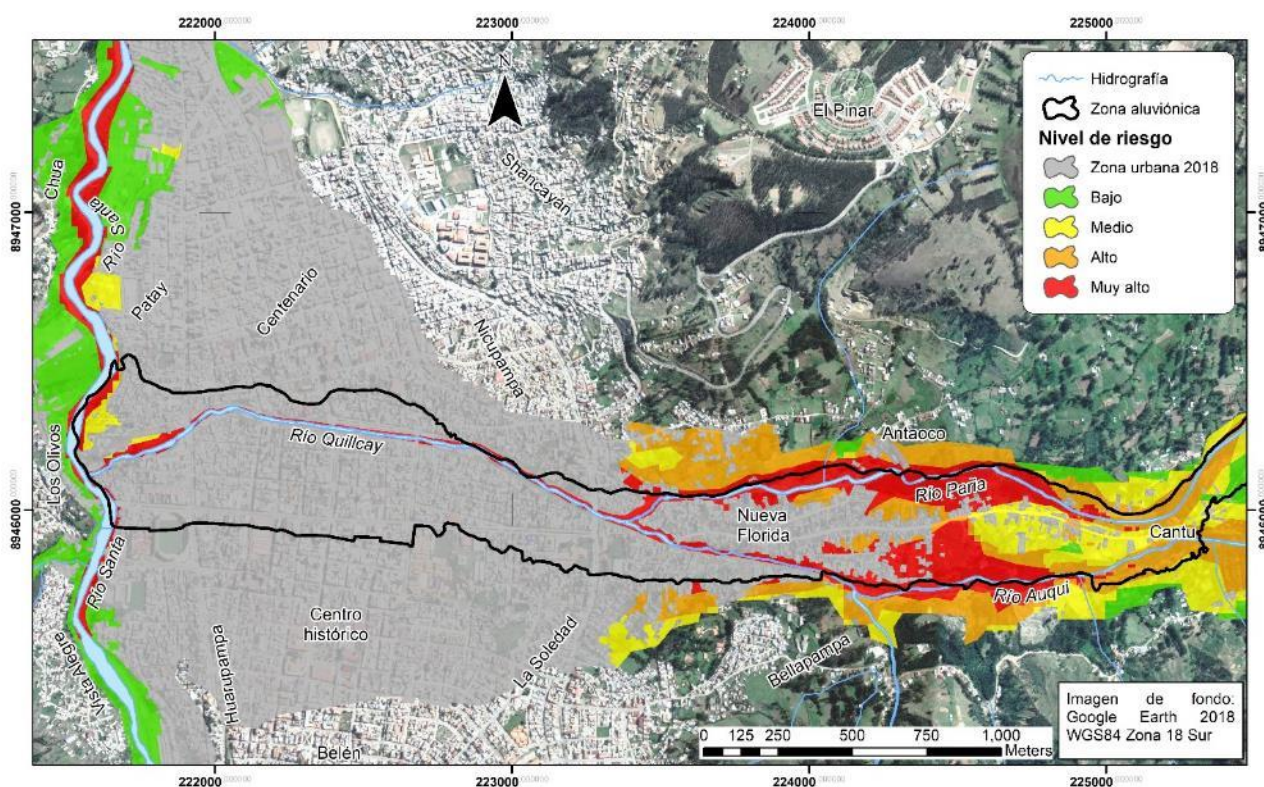


Figura 96. Mapa prospectivo integrado de riesgo frente a aluviones. Elaborado por el autor.

Cuadro 48. Riesgo prospectivo integrado frente a aluviones

Nivel de riesgo	Área (ha)	%
Bajo	50.7	31.2%
Medio	23.9	14.7%
Alto	35.4	21.8%
Muy alto	52.5	32.3%
Total	162.5	100.0%

Fuente. Elaborado por el autor

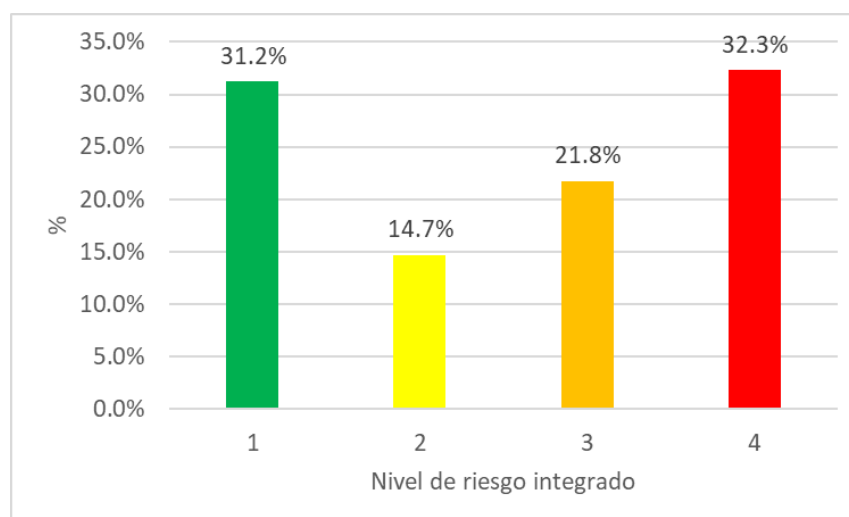


Figura 97. Distribución de áreas del mapa de riesgo prospectivo integrado frente a aluviones. Elaborado por el autor.

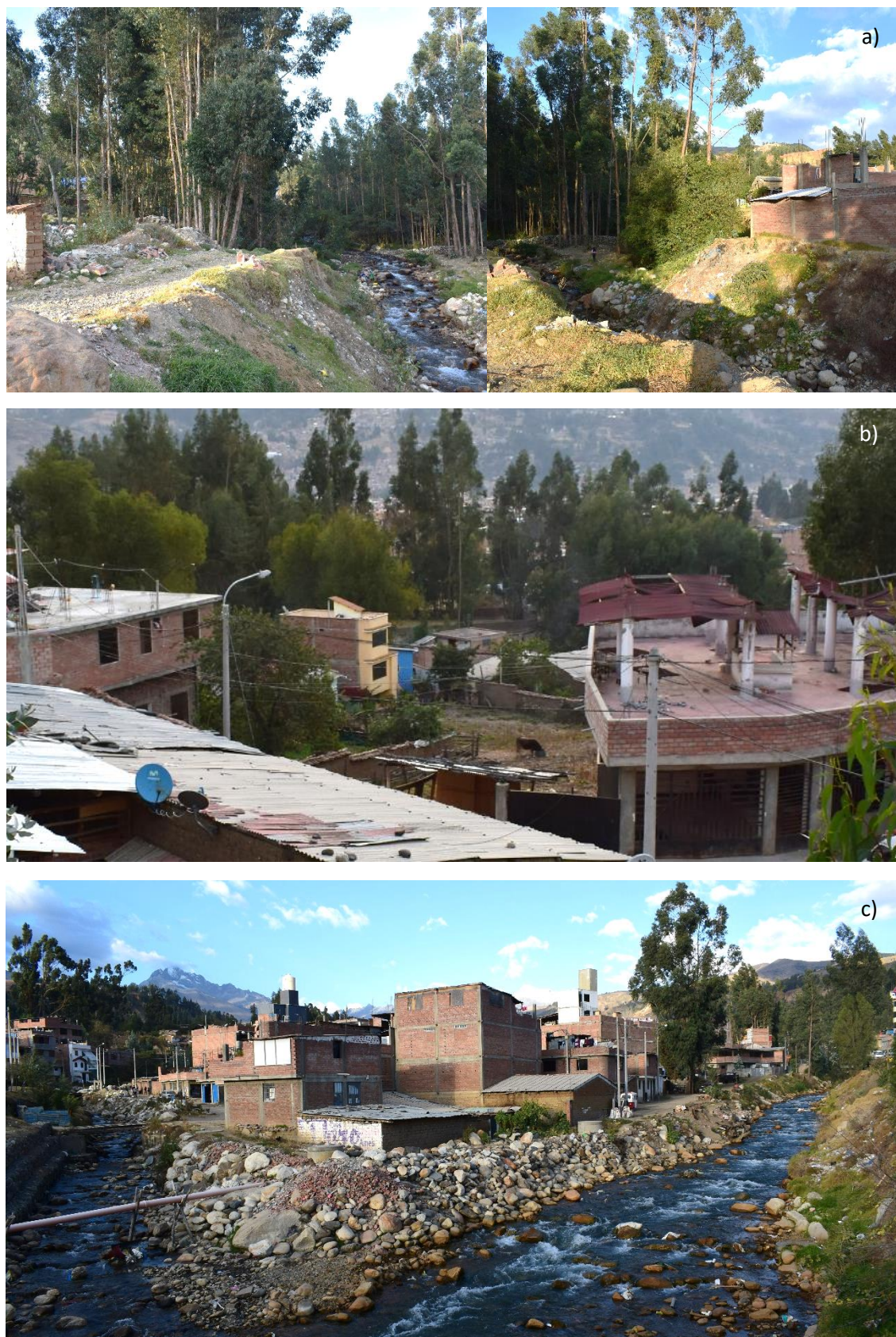


Figura 98. Fotografías de las zonas de riesgo prospectivo por exposición frente a aluviones a) Muy alto riesgo en Antaoco y Nueva Florida b) Riesgo medio y alto en Bellapampa c) Muy alto riesgo en las franjas marginales de los ríos Paria y Auqui. Elaborado por el autor.

CONCLUSIONES

1. Después de acontecido el aluvión en la ciudad de Huaraz en 1941 y con respecto al año 1948 (año base), el área urbana/poblada de la ciudad de Huaraz creció en 664 ha (de 111 ha a 775 ha), es decir 598%, siendo el período 1977-2001 el que muestra mayor incremento absoluto con 249 ha, y el período 1962-1977 el que muestra mayor crecimiento porcentual con 115%. En el período de análisis las áreas urbanas/pobladas del distrito de Independencia son las que muestran mayor crecimiento pasando de ocupar 14% en 1948 a 52% en el 2018. Los principales barrios o sectores que se desarrollaron con posterioridad al aluvión de 1941 fueron Centenario, Nicrupampa, Shancayán, Cascapampa, Nueva Florida y Los Olivos en el Distrito de Independencia; y Pedregal, Villón, Challhua, Rosas Pampa, Tacllán y Vista Alegre en el distrito de Huaraz.
2. Entre 1948 y 2018 la ciudad de Huaraz y su zona urbano marginal han presentado una tendencia de crecimiento en dirección Sur-Norte con un ligero sesgo hacia el Este el mismo que es observable a partir del año 2001. El 50% de las nuevas áreas urbanas/pobladas con respecto a 1948 crecieron con dirección Norte (NO-N-NE) y un 29% hacia direcciones Sur (SE-E-SO).
3. Con respecto al año base en 1948, el área urbana/poblada de la ciudad de Huaraz se ha expandido en un 94% hasta los 2,500 metros de distancia euclidiana con respecto al centro medio global hasta el año 2018. La zona ubicada entre 2,000 y 2,500 metros con respecto al centro medio global es la que experimentó mayor ocupación de áreas urbanas/pobladas.
4. Las áreas urbanas/pobladas de la ciudad de Huaraz se han expandido en altitud alcanzando el 2018 hasta 3,350 m s.n.m. con respecto a 1948 año

en el que llegaban hasta 3,250 m s.n.m. Predominan las áreas ubicadas entre 3,050 y 3,150 m s.n.m., aquellas localizadas debajo de los 3,050 m s.n.m. y encima de 3,250 m s.n.m. experimentaron un mayor crecimiento porcentual en relación al año 1948.

5. Entre 1948 y 2018 las nuevas áreas urbanas o pobladas en la ciudad de Huaraz ocuparon paulatinamente territorios más empinados, en 1948 el 93% del área urbana/poblada se ubicaba en pendientes de hasta 15%, el 93% del área de crecimiento hasta el 2018 con respecto a 1948 posee pendientes de hasta 30% observando inclusive áreas de expansión con pendientes de hasta 45%.
6. El factor con mayor incidencia en el establecimiento de nuevas áreas urbanas/pobladas es la distancia al centro medio global de crecimiento de la ciudad al obtener un coeficiente estandarizado de -0.412 en el modelo de regresión logística, la pendiente es el segundo factor con un coeficiente de -0.318 y la altitud el factor con menor incidencia con un coeficiente de -0.260.
7. Un total de 382 ha correspondientes al 21% de la zona de análisis excluyendo la cobertura urbana/poblada del año 2018 posee probabilidades de bajas a muy altas (superiores a 0.2) de albergar a futuro nuevas áreas urbanas o pobladas, predominando aquellas con probabilidades de 0.2 a 0.4 con el 11% del total. En conjunto, estas áreas se ubican en diversos sectores urbano marginales de la ciudad en sectores o barrios como Cascapampa, Palmira, El Pinar, Shancayán, Picup, Chua Alta, Los Olivos, Cochac, Vista Alegre, Mitucro, Nueva Florida, Antaoco, Bellapampa, Pedregal, Río Seco, Challhua y Tacllán. Destacan entre estas áreas las localizadas al Oeste y Este de la ciudad al Oeste siguiendo la margen Oeste del río Santa y al Este dentro y alrededor de la zona aluviónica con tendencia hacia el Norte.
8. El 96%, es decir 1,703 ha, del área de análisis excluyendo el área urbana/poblada del año 2018 posee una capacidad de acogida de baja a

muy alta, predominando las áreas con capacidad de baja a media con 89% del total. Se observa una importante coincidencia espacial entre las áreas con altas probabilidades superiores a 0.6 en el modelo de regresión logística y las áreas con capacidades de acogida altas a muy altas en el modelo de EMC en los sectores de Antaoco, Nueva Florida y Bellapampa, Vista Alegre, Los Olivos, Chua y Taclán que serían a futuro aquellos que experimenten mayor crecimiento de zonas urbanas o pobladas, sin embargo, en condiciones de ocupación no planificada, hacinamiento y muchos casos precariedad.

9. La exposición de la ciudad de Huaraz a un aluvión potencial de origen glaciar expresada en la ocupación de la zona aluviónica se ha incrementado paulatinamente desde 1941 en un 279%, en 1948 la ocupación de la zona aluviónica era de 3 ha, para el año 2018 fue de 93 ha correspondiente al 66% de área aluviónica dentro de la zona de análisis. La tendencia histórica de ocupación específicamente de la zona aluviónica ha sido hacia el Este en territorios con mayor pendiente y altitud que en el núcleo urbano pertenecientes al barrio de Nueva Florida.
10. Del modelo de regresión logística se tiene que el 21% de la superficie de la zona aluviónica presenta probabilidades de baja a muy alta de ocupación de nuevas áreas urbanas/pobladas, predominando las áreas con probabilidades moderadas de 0.2 a 0.4 el 7% de la zona aluviónica total o el 19% del área aluviónica aún no ocupada, estas áreas corresponden al barrio de Nueva Florida y cuyo crecimiento se espera continúe pese a la falta de planificación, pues se trata de áreas dinámicas estrechamente relacionadas al núcleo urbano de la ciudad que cuentan con servicios básicos y vías pavimentadas pero aún con sectores de crecimiento precario.
11. Los resultados de la EMC–WLC muestran que toda el área aluviónica aún no ocupada por zonas urbanas o pobladas (34% o 47 ha) poseen niveles de capacidad de acogida de baja a muy alta predominando las áreas de probabilidad media con el 15% del área aluviónica total o el 44% del área

aluviónica aún no ocupada. Las áreas con niveles de idoneidad o capacidad de acogida de media a muy alta comprenden sectores del barrio de Nueva Florida.

12. La ratio anual de crecimiento de áreas urbanas o pobladas dentro de la zona aluviónica para el período de análisis fue en promedio de 1.3 ha/año siendo el período 1962-1977 el que muestra una mayor velocidad de crecimiento con 2.2 ha/año y el período 2001-2018 en de menor velocidad con 0.6 ha/año. La zona aluviónica dentro de la zona de análisis podría estar completamente poblada en los próximos 37 años incrementando la vulnerabilidad por exposición de su población.
13. Se han identificado cuatro mapas de peligro de aluvión correspondientes a los años 2003, 2004, 2014 y 2016; los dos primeros con un menor porcentaje relativo de ajuste a la zona aluviónica y elaborados mediante interpretación visual. Los dos últimos comprenden la zona aluviónica en su totalidad, emplearon control sistemático de campo y modelamiento numérico especializado. Los tres primeros mapas no fueron empleados de manera decisiva en la planificación urbana y la gestión de riesgos.
14. Según el mapa de peligro de aluvión del año 2016 reconocido oficialmente, se tienen 495 ha con algún nivel de peligro dentro de la zona de análisis, 367 ha (74%) de las cuales presenta niveles de peligro considerables (de medio a muy alto) predominando las áreas con muy alto nivel de peligro con 171 ha correspondientes al 35% del total. El total de la zona aluviónica se encuentra comprendida dentro de este mapa de peligro, el 81% de su superficie corresponde a niveles de peligro de medio a muy alto.
15. El nivel de riesgo de la ciudad de Huaraz frente a aluviones de origen glaciar se ha incrementado desde 1941 debido al crecimiento de áreas urbanas o pobladas en zonas expuestas a dicho peligro, pero también al incremento del nivel de peligro en las lagunas de la cabecera de cuenca, sobre todo en la laguna Palcacocha cuyo volumen creció de 514,800 m³ en 1974, a 17'403,353 m³ el 2016.

16. El área urbana/poblada con alto nivel de riesgo para 1948 fue de 3.4 ha (3% del área urbana/poblada), para 1962 fue de 13.1 ha (8% del área urbana/poblada) y de 46.3 ha en 1977 (14% del área urbana/poblada). Para el año 2001 un total de 130 ha presentan niveles de riesgo alto o muy alto (22% del área urbana/poblada) áreas que se incrementan el 2018 con 145 ha con niveles de riesgo alto o muy alto (18% del área urbana/poblada).
17. Desde un punto de vista prospectivo, las áreas con algún nivel de riesgo aún no ocupadas por zonas urbanas/pobladas el de 163 ha de las cuales presentan un nivel de riesgo alto o muy alto, 81 ha (50%) en base la probabilidad de ocupación obtenido del modelo de regresión logística y 87 ha (54%) en base a los resultados de la EMC. Existe una alta similaridad espacial entre ambos resultados.
18. El mapa de riesgo prospectivo integrado en base a los mapas de riesgo prospectivo parciales elaborados mediante regresión logística y EMC, muestra que 54% (88 ha) del área en riesgo, excluyendo la zona urbana correspondiente al año 2018, posee niveles de riesgo alto o muy alto predominando las de riesgo muy alto con 53 ha (32%). Estas áreas se ubican en la zona aluviónica comprendiendo sectores de los barrios de Nueva Florida, Cantu y Antaoco en el distrito de Independencia; y Bellapampa en el distrito de Huaraz, existen también áreas con muy alto nivel de riesgo en una franja adyacente a los ríos Santa y Quillcay

RECOMENDACIONES

1. Las técnicas de análisis de la tendencia de crecimiento de la ciudad de Huaraz empleadas en la presente investigación podrían ser complementadas o mejoradas con la aplicación de otras técnicas de modelamiento computacional tales como autómatas celulares, análisis fractal, análisis de Fourier, Wavelets entre otros.
2. Es importante el fortalecimiento de las capacidades locales a nivel de entidades técnicas y académicas en materia de modelamiento computacional especializado aplicado a la gestión de riesgos, pues se ha evidenciado una alta dependencia de entidades científicas foráneas para lograr contar con información técnico científica relevante.
3. Una tarea pendiente de parte de las autoridades locales, regionales, y las entidades técnicas o científicas es el establecimiento de una relación más estrecha y fluida que permita basar la toma de decisiones para la gestión del territorio en evidencia científica, pese a los avances logrados en los últimos años, por ejemplo con el mapa de peligro de aluvión del año 2016, existe aún un disloque entre ambos sectores con consecuencias como las que evidencia la presente investigación, como es permitir el crecimiento de áreas urbanas en áreas expuestas a altos niveles de peligro.
4. Promover el uso de software libre especializado y las redes de investigación colaborativa es una alternativa importante para difundir, hacer accesible y facilitar el desarrollo de investigaciones y estudios orientados a la gestión adecuada de nuestro territorio.
5. La adopción del estándar ISO 37120 – Ciudades y Comunidades Sostenibles, en las políticas e instrumentos de gestión de las ciudades contribuiría a reducir los riesgos asociados a su crecimiento no planificado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alba, C. (2017). *Huarás - Historia de un Pueblo en Transformación*. Huaraz: Killa.
- Arkiplus. (15 de Marzo de 2019). *Crecimiento urbano* | Arkiplus. Obtenido de <https://www.arkiplus.com/crecimiento-urbano/>
- Autoridad Nacional del Agua. (2014). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas*. Huaraz: ANA.
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 15-31.
- Barry, R., & Yew Gan, T. (2011). *The Global Cryosphere*. New York: Cambridge.
- Bosque, J. (2000). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: RIALP.
- Buzai, G., & Baxendale, C. (2011). *Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires: Lugar.
- CENEPRED. (2014). *Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales*. Lima: CENEPRED.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Ariel Ciencia.
- Cochachin, A., & Salazar, C. (2016). *Batimetría de la Laguna Palcacocha*. Huaraz: ANA.
- Deagostini, D. (1990). *Introducción a la Fotogrametría*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Donato, G., & Belongie, S. (2002). Approximate thin plate spline mappings. *ECCV 2002*, 21-31.
- Dyrgerov, M., & Meier, M. (2005). *Glaciers and the changing Earth system: a 2004 snapshot*. Boulder: INSTAAR.
- Eastman, R. (2010). *IDRISI Selva Manual*. Worcester: Clark University.
- El Peruano. (22 de Julio de 2017). Ley que declara de preferente interés nacional y necesidad pública la protección, conservación y prevención de riesgos de la laguna Palcacocha de Ancash. *Normas Legales*, pág. 4.
- Frey, H. (2016). *Modelización de cadenas de procesos relacionados a desbordes de lagunas glaciares en la sub-cuenca Quillcay, Cordillera Blanca*. Huaraz: CARE PERU.

- García, D. R. (2018). *Factores de riesgo de la quebrada Cunduanda sobre las zonas de expansión urbana de Riobamba*. Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo.
- González, F. (1992). *Huarás, visión integral*. Huaraz: SAFORI.
- GRPPAT. (2014). *Estudio de diagnóstico y zonificación con fines de demarcación territorial de la rrovincia de Huaraz*. Huaraz: Gobierno Regional de Ancash.
- Huggel, C. (2004). *Assessment of Glacial Hazards based on Remote Sensing and GIS Modeling*. Zurich: Geographisches Institut der Universität Zürich.
- INAIGEM. (2018). *Inventario Nacional de Glaciares - Las Cordilleras Glaciares del Perú*. Huaraz: INAIGEM.
- INDECI. (2003). *Plan de Prevención Ante Desastres: Usos del Suelo y Medidas de Mitigación - Ciudad de Huaraz*. Lima: INDECI.
- INEI. (2009). *Pefil sociodemográfico del departamento de Ancash*. Lima: INEI.
- INEI. (2018). *Perú: Crecimiento y distribución de la población, 2017*. Lima: INEI.
- INEI. (06 de 06 de 2019). *3.1.1 CAMBIOS EN LA COMPOSICION URBANO-RURAL*. Obtenido de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0018/cap31001.htm
- INEI. (06 de 06 de 2019). *CENSOS NACIONALES 2017: XII DE POBLACION, VII DE VIVIENDA Y III DE COMUNIDADES INDIGENAS*. Obtenido de <http://censos2017.inei.gob.pe/redatam/>
- INGEMMET. (2009). *Riesgos Geológicos en la Región Ancash*. Lima: INGEMMET.
- INGEMMET. (2013). *Laguna Palcacocha y Su Influencia en la Ciudad de Huaraz Cordillera Blanca*. Lima: INGEMMET.
- International Organization for Standardization. (15 de 7 de 2020). *ISO Online Browsing Platform (OBP)*. Obtenido de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:37120:ed-2:v1:en:sec:A>
- IPCC. (2014). *CAMBIO CLIMÁTICO 2014 - informe de Síntesis*. Ginebra: OMM-PNUMA.
- ISOTools. (8 de Agosto de 2018). *Isotools Excellence*. Obtenido de <https://www.isotools.org/2018/08/08/iso-37120-norma-que-mejorara-las-ciudades/>
- Kaser, G., & Osmaston, H. (2002). *Tropical Glaciers*. Cambridge: UNESCO.
- Leclercq, P., Orlemans, J., Basagic, H., Bushueva, I., Cook, A., & Le Bris, R. (2014). A data set of worldwide glacier length fluctuations. *The Cryosphere*, 659-672.

- Lemos, A., Shepherd, A., McMillan, M., Hogg, A., Hatton, E., & Joughin, I. (2018). Ice velocity of Jakobshavn Isbræ, Petermann Glacier, Nioghalvfjærdsfjorden, and Zachariæ Isstrøm, 2015–2017, from Sentinel 1-a/b SAR imagery. *The Cryosphere*, 2087-2088.
- López, M. (2008). Riesgo en el piedemonte del Gran Mendoza por avance urbano. Argentina. *Tiempo y espacio*, 47-48.
- MDI-MPH. (2018). *Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres de la Subcuenca Quillcay 2018-2021*. Huaraz: Municipalidad Distrital de Independencia.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2009). *Análisis del riesgo en procesos de desarrollo e inversión*. Lima: MEF.
- Mitchell, A. (2005). *The ESRI Guide to GIS Analysis Vol. 2: Spatial measurements & statistics*. California: ESRI Press.
- Nong, Y., & Du, Q. (2011). Urban growth pattern modeling using logistic regression. *Geo-spatial Information Science*, 62-67.
- Population.city. (7 de 3 de 2019). *Huaraz - Población*. Obtenido de <http://poblacion.population.city/peru/huaraz/>
- Radić, V., & Hock, R. (2010). Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *Jornal of Geophysical Research*, 1-10.
- Rojas, C., & Plata, W. (2010). Área Metropolitana de Concepción: Factores espaciales explicativos de su crecimiento urbano reciente (2001-2009) por medio de un modelo de regresión logística espacial. *Postgrados UNAH N°4 Vol II*, 124-135.
- Saaty, T. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 234-281.
- Sánchez, L. (2018). *Análisis de la vulnerabilidad ante la probable ocurrencia de flujo de detritos en la quebrada Carossio, distrito de Lurigancho-Chosica, Lima-Lima*. Lima: Universidad Nacional Federico Villareal.
- Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S., & García, J. (2014). Mapping hazards from glacier lake outbursts floods based on modelling of process cascades al Lake 513, Carhuaz, Perú. *Advances in Geosciences*, 145.
- SENAMHI-GEF-PNUD. (2009). *Escenarios Climáticos en el Perú para el Año 2030*. Lima: MINAM.
- Sobrinho, J., Kerr, Y., Osorio, A., López, M., Raissouni, N., El-Kharraz, H., . . . Belaid, A. (2000). *Teledetección*. Valencia: Universidad de Valencia.

- Somos, M. (2014). *Vulnerability and Decision Risk Analysis in Glacier Lake Outburst Floods (GLOF). Case Studies: Quillcay Sub Basin in the Cordillera Blanca in Peru and Dudh Koshi Sub Basin in the Everest Region in Nepal*. Austin, Texas, EEUU: THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN.
- Somos, M., Chisolm, R., McKinney, D., & Rivas, D. (2014). *Modelo de Inundación por Potencial Aluvión desde la Laguna Palcacocha, Huaraz, Perú*. Huaraz: MINAM.
- Tecsi C., L., & Tupa R., J. (2017). Aluvión en el Chicón. *El Antoniano*, 107 - 108.
- UdeC. (15 de Marzo de 2019). *Explorando el concepto Geomática | DCGG-UdeC*. Obtenido de www.geomatica.udec.cl/v2/blog/2017/05/explorando-el-concepto-geomatica.php
- Wegner, S. (2014). *Lo que el agua se llevó*. Huaraz: MINAM-BID.
- WGMS. (2008). *Global Glacier Changes: facts and figures*. Zurich: UNEP.
- WGMS. (2017). *Global Glacier Change Bulletin*. Zurich: ICSU (WDS) – IUGG (IACS) – UNEP – UNESCO – WMO.

ANEXOS

Anexo 1: Imágenes empleadas en la investigación

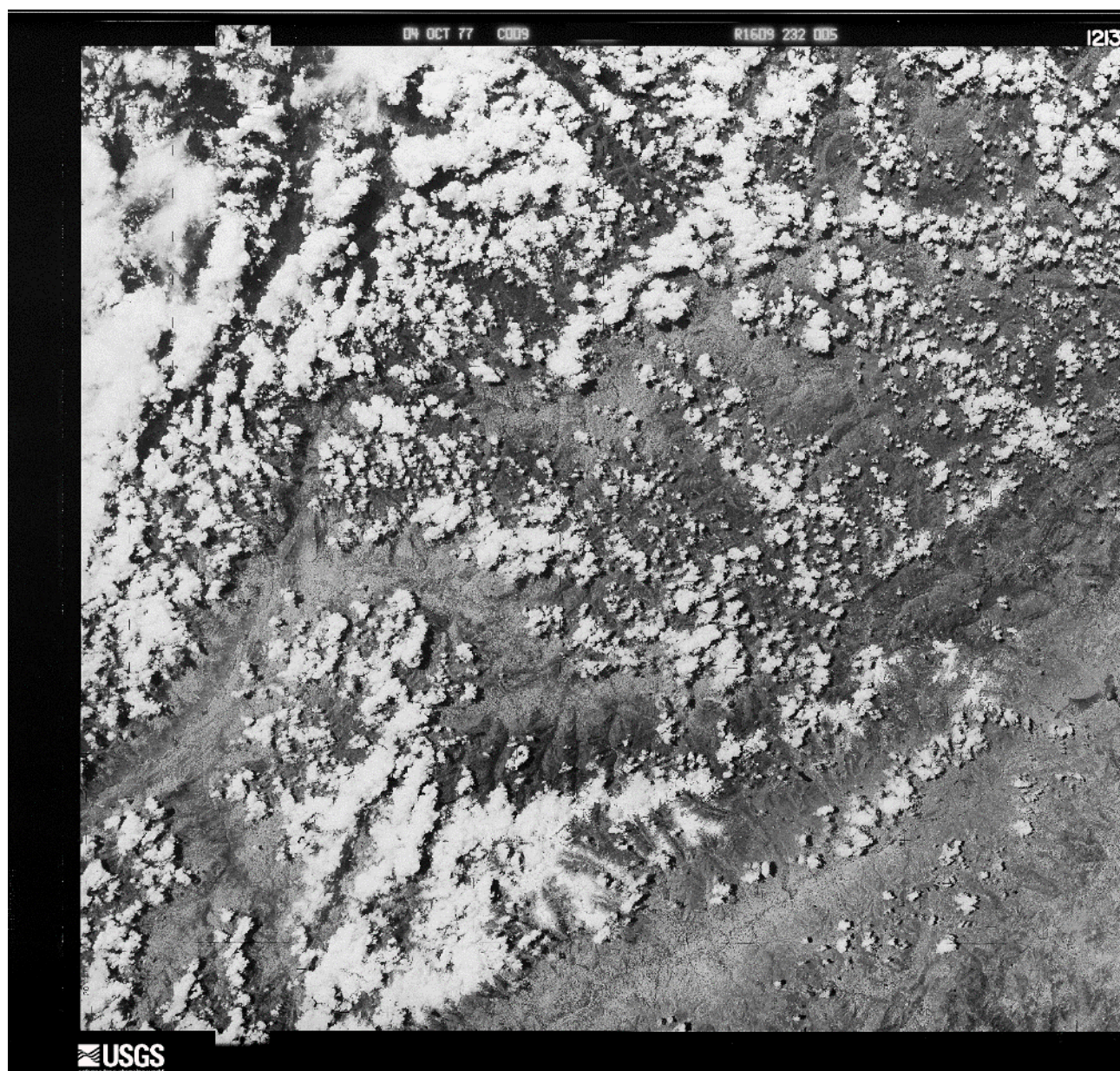
Fotografía aérea 2524-53



Fotografía aérea 2524-91



Fotografía aérea 14241



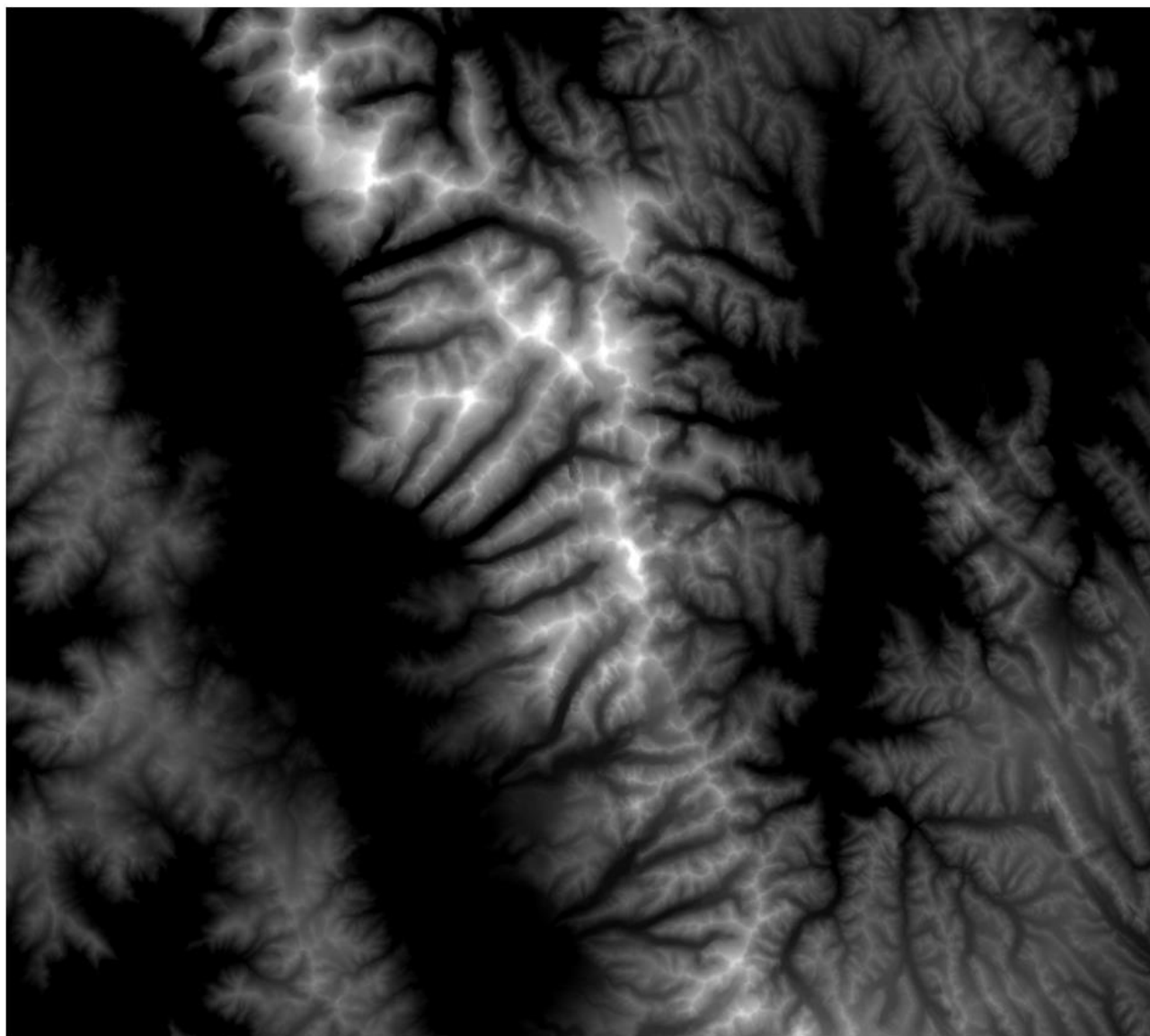
Fotografia satelital DZB1213-500232L005001



Fotografía aérea 2C-10A-53

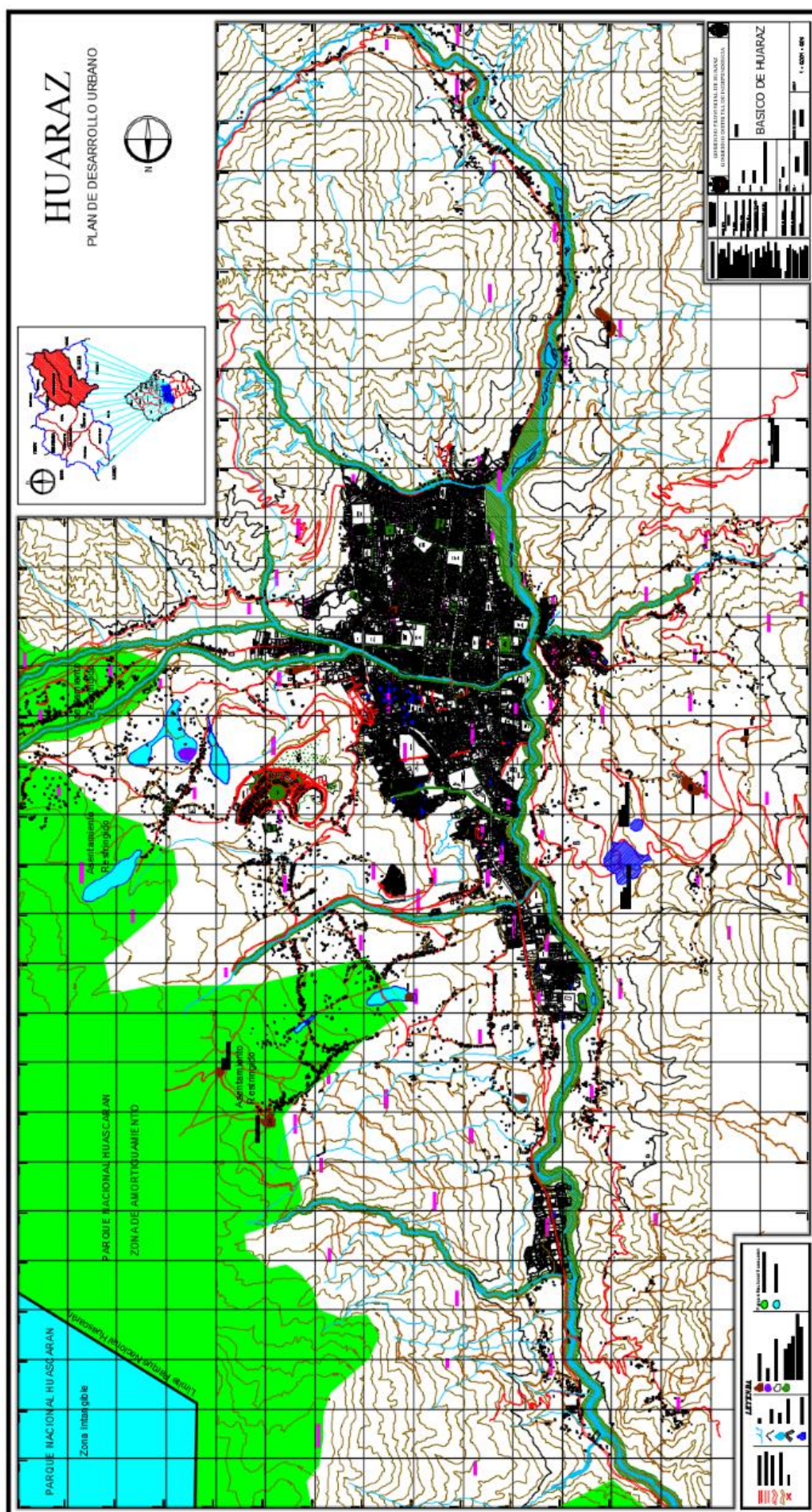


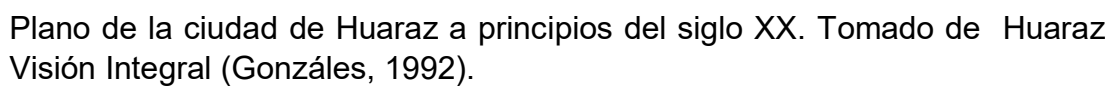
Fotografía satelital Google Earth 2018



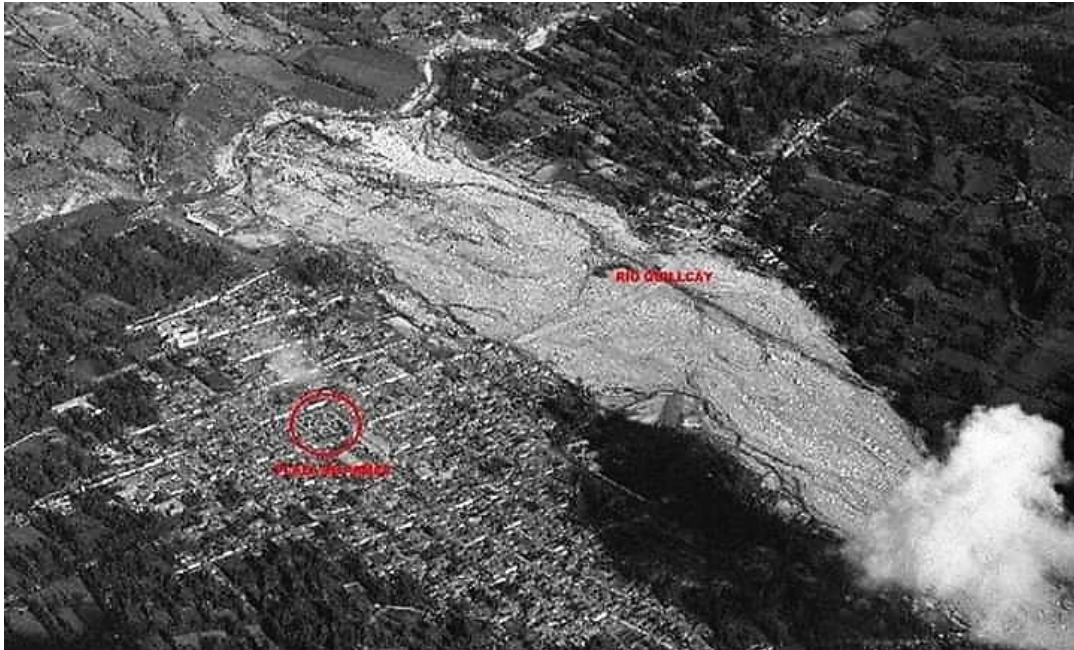
Modelo de elevación digital AP_27249_FBS_F6990_RT1.dem.tif

Anexo 2: Vista del Plano Básico Catastral de la ciudad de Huaraz





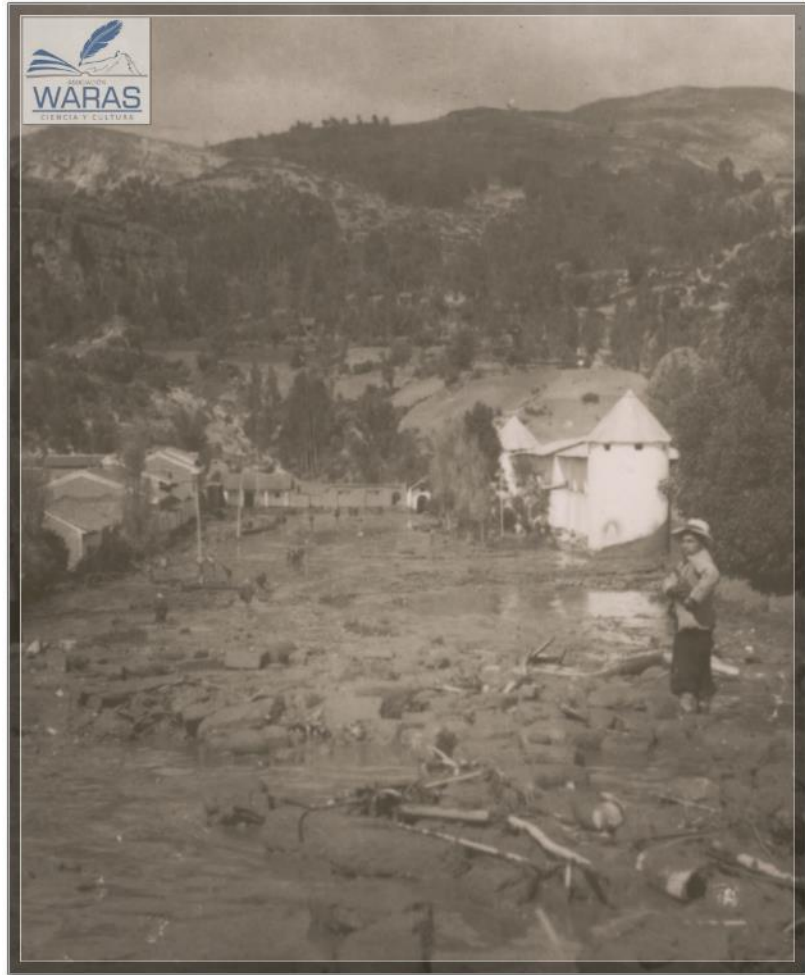
Anexo 4: Fotografías de los impactos del aluvión de 1941



Vista aérea SAN 1942 de Huaraz y el área afectada por el aluvión. Tomada de <http://jcsfhuaraz.blogspot.com/2018/01/avalanchas-y-aluviones-catastroficos-en.html>



Pérdida de vidas humanas y materiales. Tomada de Lo que el Agua se Llevó. (Wegner, 2014)



Jirón Bolognesi destruido. Tomada de <http://www.pcca.org.pe/fototeca/show/28>



Avenida Raimondi destruida. Tomada de Lo que el Agua se Llevó. (Wegner, 2014)

Anexo 5: Resultados de análisis ROC (Relative Operating Characteristic)

Result of ROC**

=====

AUC = 0.916

The following section list detailed statistics for each threshold.

With each threshold, the following 2x2 contingency table is calculated

Reality (reference image)			

Simulated by threshold	1	0	

1	A(number of cells)	B(number of cells)	
0	C	D	
For the given reference image: A+C=7705018 B+D=17887206			

No.	Exp. Thrhlds(%)	Act. Thrhlds(%)	Act. raw cuts	A	True posi.(%)	B	False posi.(%)

1	0.0000	0.0000	0.0000	0	0.0000	0	0.0000
2	1.0000	1.0000	0.9699	253713	3.2928	2209	0.0123
3	2.0000	2.0000	0.9619	503299	6.5321	8546	0.0478
4	3.0000	3.0000	0.9549	752720	9.7692	15047	0.0841
5	4.0000	4.0000	0.9480	1002800	13.0149	20890	0.1168
6	5.0000	5.0000	0.9410	1253025	16.2625	26587	0.1486
7	6.0000	6.0000	0.9334	1500816	19.4784	34717	0.1941
8	7.0000	7.0000	0.9254	1744424	22.6401	47033	0.2629
9	8.0000	8.0000	0.9159	1989533	25.8213	57845	0.3234
10	9.0000	9.0000	0.9053	2226845	28.9012	76456	0.4274
11	10.0000	10.0000	0.8932	2461314	31.9443	97908	0.5474
12	11.0000	11.0000	0.8805	2691691	34.9343	123455	0.6902
13	12.0000	12.0000	0.8658	2909768	37.7646	161300	0.9018
14	13.0000	13.0000	0.8491	3120796	40.5034	206193	1.1527
15	14.0000	14.0000	0.8322	3322794	43.1251	260117	1.4542
16	15.0000	15.0000	0.8139	3520168	45.6867	318666	1.7815
17	16.0000	16.0000	0.7933	3702185	48.0490	392571	2.1947
18	17.0000	17.0000	0.7713	3887271	50.4512	463407	2.5907
19	18.0000	18.0000	0.7482	4072030	52.8491	534570	2.9886
20	19.0000	19.0000	0.7258	4260889	55.3002	601634	3.3635
21	20.0000	20.0000	0.7031	4441904	57.6495	676542	3.7823
22	21.0000	21.0000	0.6797	4622953	59.9992	751414	4.2008
23	22.0000	22.0000	0.6555	4807630	62.3961	822659	4.5991
24	23.0000	23.0000	0.6294	4983892	64.6837	902320	5.0445
25	24.0000	24.0000	0.6024	5154059	66.8922	988075	5.5239
26	25.0000	25.0000	0.5720	5315244	68.9842	1082813	6.0536
27	26.0000	26.0000	0.5411	5465257	70.9311	1188721	6.6456
28	27.0000	27.0000	0.5109	5606758	72.7676	1303142	7.2853
29	28.0000	28.0000	0.4785	5741293	74.5137	1424530	7.9640
30	29.0000	29.0000	0.4489	5864943	76.1185	1556802	8.7034
31	30.0000	30.0000	0.4197	5973337	77.5253	1704330	9.5282
32	31.0000	31.0000	0.3924	6073628	78.8269	1859961	10.3983
33	32.0000	32.0000	0.3664	6164497	80.0063	2025015	11.3210
34	33.0000	33.0000	0.3426	6250671	81.1247	2194763	12.2700
35	34.0000	34.0000	0.3204	6329303	82.1452	2372053	13.2612
36	35.0000	35.0000	0.2989	6397547	83.0309	2559731	14.3104
37	36.0000	36.0000	0.2788	6464441	83.8991	2748761	15.3672
38	37.0000	37.0000	0.2605	6523453	84.6650	2945671	16.4680
39	38.0000	38.0000	0.2437	6576639	85.3553	3148406	17.6014
40	39.0000	39.0000	0.2295	6627861	86.0201	3353107	18.7458
41	40.0000	40.0000	0.2164	6674491	86.6253	3562399	19.9159

42	41.0000	41.0000	0.2039	6720437	87.2216	3772375	21.0898
43	42.0000	42.0000	0.1923	6766252	87.8162	3982482	22.2644
44	43.0000	43.0000	0.1821	6813293	88.4267	4191363	23.4322
45	44.0000	44.0000	0.1726	6857506	89.0005	4403073	24.6158
46	45.0000	45.0000	0.1640	6893826	89.4719	4622675	25.8435
47	46.0000	46.0000	0.1561	6932759	89.9772	4839664	27.0566
48	47.0000	47.0000	0.1485	6969366	90.4523	5058979	28.2827
49	48.0000	48.0000	0.1416	7005763	90.9247	5278505	29.5099
50	49.0000	49.0000	0.1349	7037308	91.3341	5502882	30.7643
51	50.0000	50.0000	0.1286	7071631	91.7795	5724481	32.0032
52	51.0000	51.0000	0.1227	7103913	92.1985	5948122	33.2535
53	52.0000	52.0000	0.1171	7132946	92.5753	6175011	34.5219
54	53.0000	53.0000	0.1118	7162606	92.9603	6401273	35.7869
55	54.0000	54.0000	0.1068	7192525	93.3486	6627277	37.0504
56	55.0000	55.0000	0.1017	7222034	93.7316	6853689	38.3162
57	56.0000	56.0000	0.0970	7252388	94.1255	7079257	39.5772
58	57.0000	57.0000	0.0927	7280203	94.4865	7307365	40.8525
59	58.0000	58.0000	0.0883	7307518	94.8410	7535972	42.1305
60	59.0000	59.0000	0.0843	7328861	95.1180	7770552	43.4420
61	60.0000	60.0000	0.0806	7352119	95.4199	8003215	44.7427
62	61.0000	61.0000	0.0771	7374798	95.7142	8236459	46.0466
63	62.0000	62.0000	0.0737	7395900	95.9881	8471279	47.3594
64	63.0000	63.0000	0.0703	7415697	96.2450	8707405	48.6795
65	64.0000	64.0000	0.0672	7435732	96.5051	8943291	49.9983
66	65.0000	65.0000	0.0641	7450497	96.6967	9184450	51.3465
67	66.0000	66.0000	0.0610	7466965	96.9104	9423904	52.6852
68	67.0000	67.0000	0.0579	7483592	97.1262	9663198	54.0230
69	68.0000	68.0000	0.0548	7500040	97.3397	9902672	55.3618
70	69.0000	69.0000	0.0518	7516973	97.5594	10141662	56.6979
71	70.0000	70.0000	0.0489	7533277	97.7710	10381280	58.0375
72	71.0000	71.0000	0.0462	7549149	97.9770	10621330	59.3795
73	72.0000	72.0000	0.0435	7564056	98.1705	10862346	60.7269
74	73.0000	73.0000	0.0409	7578689	98.3604	11103635	62.0258
75	74.0000	74.0000	0.0384	7591741	98.5298	11346505	63.4336
76	75.0000	75.0000	0.0360	7604180	98.6913	11589989	64.7949
77	76.0000	76.0000	0.0337	7614468	98.8248	11835623	66.1681
78	77.0000	77.0000	0.0314	7623095	98.9368	12082917	67.5506
79	78.0000	78.0000	0.0292	7632016	99.0525	12329919	68.9315
80	79.0000	79.0000	0.0270	7640918	99.1681	12576939	70.3125
81	80.0000	80.0000	0.0249	7648825	99.2707	12824955	71.6990
82	81.0000	81.0000	0.0228	7656448	99.3696	13073254	73.0872
83	82.0000	82.0000	0.0207	7663168	99.4568	13322456	74.4804
84	83.0000	83.0000	0.0187	7669020	99.5328	13572527	75.8784
85	84.0000	84.0000	0.0168	7674520	99.6042	13822948	77.2784
86	85.0000	85.0000	0.0150	7680163	99.6774	14073228	78.6776
87	86.0000	86.0000	0.0134	7684772	99.7372	14324542	80.0826
88	87.0000	87.0000	0.0120	7689579	99.7996	14575657	81.4865
89	88.0000	88.0000	0.0106	7694638	99.8653	14826519	82.8890
90	89.0000	89.0000	0.0094	7697241	99.8991	15079838	84.3052
91	90.0000	90.0000	0.0083	7699402	99.9271	15333600	85.7238
92	91.0000	91.0000	0.0073	7701230	99.9508	15587694	87.1444
93	92.0000	92.0000	0.0063	7702620	99.9689	15842227	88.5674
94	93.0000	93.0000	0.0053	7703234	99.9768	16097534	89.9947
95	94.0000	94.0000	0.0045	7703952	99.9862	16352739	91.4214
96	95.0000	95.0000	0.0036	7704712	99.9960	16607902	92.8479
97	96.0000	96.0000	0.0027	7704812	99.9973	16863723	94.2781
98	97.0000	97.0000	0.0017	7704926	99.9988	17119531	95.7082
99	98.0000	98.0000	0.0009	7704978	99.9995	17375402	97.1387
100	99.0000	99.0000	0.0003	7705018	100.0000	17631284	98.5692
101	100.0000	100.0000	0.0000	7705018	100.0000	17887206	100.0000

** For the given reference image, the following seven statistics are the same for all thresholds. The unit of each statistic is the proportion correct attributable to a combination of information of location and quantity.

No info of location and no info of quantity: $N(n) = 0.5000$
 Perfect info of location and perfect info of quantity: $P(p) = 1.0000$
 Perfect info of location and no info of quantity: $P(n) = 0.8011$
 No info of location and perfect info of quantity: $N(p) = 0.5791$

No info of location and no info of quantity: PerfectChance = 0.5000
 No info of location and perfect info of quantity: PerfectQuantity = 0.0791
 Perfect info of location given no info of quantity: PerfectLocation = 0.4209

No.	M(m)	N(m)	P(m)	M(p)	M(n)
1	0.6989	0.6989	0.6989	0.5791	0.5000
2	0.7088	0.6950	0.7089	0.9948	0.7974
3	0.7183	0.6910	0.7189	0.9899	0.7939
4	0.7278	0.6870	0.7289	0.9882	0.7926
5	0.7373	0.6830	0.7389	0.9877	0.7923
6	0.7469	0.6790	0.7489	0.9875	0.7921
7	0.7562	0.6751	0.7589	0.9864	0.7913
8	0.7653	0.6711	0.7689	0.9842	0.7898
9	0.7744	0.6671	0.7789	0.9830	0.7889
10	0.7830	0.6631	0.7889	0.9800	0.7868
11	0.7913	0.6591	0.7989	0.9770	0.7846
12	0.7993	0.6552	0.8089	0.9736	0.7822
13	0.8063	0.6512	0.8189	0.9684	0.7784
14	0.8128	0.6472	0.8289	0.9627	0.7744
15	0.8186	0.6432	0.8389	0.9563	0.7698
16	0.8240	0.6393	0.8489	0.9500	0.7653
17	0.8283	0.6353	0.8589	0.9423	0.7598
18	0.8327	0.6313	0.8689	0.9359	0.7552
19	0.8372	0.6273	0.8789	0.9301	0.7511
20	0.8419	0.6233	0.8889	0.9255	0.7478
21	0.8461	0.6194	0.8989	0.9204	0.7441
22	0.8502	0.6154	0.9089	0.9158	0.7408
23	0.8546	0.6114	0.9189	0.9120	0.7381
24	0.8584	0.6074	0.9289	0.9077	0.7350
25	0.8617	0.6034	0.9389	0.9031	0.7318
26	0.8643	0.5995	0.9489	0.8981	0.7282
27	0.8660	0.5955	0.9589	0.8924	0.7241
28	0.8671	0.5915	0.9689	0.8864	0.7198
29	0.8676	0.5875	0.9789	0.8803	0.7154
30	0.8673	0.5836	0.9889	0.8737	0.7107
31	0.8657	0.5796	0.9989	0.8663	0.7054
32	0.8636	0.5756	0.9911	0.8709	0.7087
33	0.8607	0.5716	0.9811	0.8763	0.7125
34	0.8574	0.5676	0.9711	0.8814	0.7163
35	0.8536	0.5637	0.9611	0.8861	0.7196
36	0.8489	0.5597	0.9511	0.8901	0.7225
37	0.8441	0.5557	0.9411	0.8941	0.7253
38	0.8387	0.5517	0.9311	0.8976	0.7278
39	0.8329	0.5477	0.9211	0.9006	0.7300
40	0.8269	0.5438	0.9111	0.9035	0.7321
41	0.8205	0.5398	0.9011	0.9062	0.7340
42	0.8141	0.5358	0.8911	0.9089	0.7359
43	0.8077	0.5318	0.8811	0.9116	0.7378
44	0.8014	0.5279	0.8711	0.9145	0.7399
45	0.7948	0.5239	0.8611	0.9173	0.7419
46	0.7877	0.5199	0.8511	0.9194	0.7434
47	0.7807	0.5159	0.8411	0.9219	0.7452
48	0.7736	0.5119	0.8311	0.9242	0.7468
49	0.7664	0.5080	0.8211	0.9266	0.7485
50	0.7589	0.5040	0.8111	0.9285	0.7499
51	0.7516	0.5000	0.8011	0.9308	0.7516
52	0.7441	0.4960	0.7911	0.9330	0.7531
53	0.7364	0.4920	0.7811	0.9349	0.7545
54	0.7287	0.4881	0.7711	0.9370	0.7560
55	0.7210	0.4841	0.7611	0.9391	0.7575
56	0.7133	0.4801	0.7511	0.9414	0.7591

57	0.7057	0.4761	0.7411	0.9438	0.7609
58	0.6979	0.4721	0.7311	0.9460	0.7625
59	0.6900	0.4682	0.7211	0.9483	0.7641
60	0.6817	0.4642	0.7111	0.9499	0.7652
61	0.6735	0.4602	0.7011	0.9518	0.7666
62	0.6653	0.4562	0.6911	0.9538	0.7680
63	0.6569	0.4523	0.6811	0.9556	0.7693
64	0.6485	0.4483	0.6711	0.9573	0.7705
65	0.6400	0.4443	0.6611	0.9591	0.7718
66	0.6312	0.4403	0.6511	0.9603	0.7727
67	0.6225	0.4363	0.6411	0.9618	0.7737
68	0.6138	0.4324	0.6311	0.9634	0.7749
69	0.6050	0.4284	0.6211	0.9650	0.7760
70	0.5964	0.4244	0.6111	0.9669	0.7774
71	0.5876	0.4204	0.6011	0.9687	0.7787
72	0.5789	0.4164	0.5911	0.9706	0.7801
73	0.5701	0.4125	0.5811	0.9725	0.7814
74	0.5612	0.4085	0.5711	0.9744	0.7828
75	0.5522	0.4045	0.5611	0.9762	0.7840
76	0.5432	0.4005	0.5511	0.9780	0.7853
77	0.5340	0.3966	0.5411	0.9794	0.7863
78	0.5247	0.3926	0.5311	0.9805	0.7872
79	0.5154	0.3886	0.5211	0.9819	0.7881
80	0.5061	0.3846	0.5111	0.9833	0.7891
81	0.4967	0.3806	0.5011	0.9847	0.7901
82	0.4873	0.3767	0.4911	0.9860	0.7911
83	0.4778	0.3727	0.4811	0.9873	0.7920
84	0.4683	0.3687	0.4711	0.9884	0.7928
85	0.4587	0.3647	0.4611	0.9896	0.7936
86	0.4491	0.3607	0.4511	0.9909	0.7946
87	0.4395	0.3568	0.4411	0.9921	0.7954
88	0.4299	0.3528	0.4311	0.9935	0.7964
89	0.4203	0.3488	0.4211	0.9953	0.7977
90	0.4105	0.3448	0.4111	0.9961	0.7983
91	0.4006	0.3409	0.4011	0.9969	0.7989
92	0.3908	0.3369	0.3911	0.9977	0.7994
93	0.3809	0.3329	0.3811	0.9984	0.7999
94	0.3709	0.3289	0.3711	0.9986	0.8001
95	0.3610	0.3249	0.3611	0.9990	0.8004
96	0.3510	0.3210	0.3511	0.9997	0.8008
97	0.3411	0.3170	0.3411	0.9997	0.8009
98	0.3311	0.3130	0.3311	0.9998	0.8009
99	0.3211	0.3090	0.3211	0.9999	0.8010
100	0.3111	0.3050	0.3111	1.0000	0.8011
101	0.3011	0.3011	0.3011	0.5791	0.5000

No.	Kno	Klocation	Kquantity	Kstandard
1	0.398	0.000	2.513	0.000
2	0.418	0.988	-0.449	0.045
3	0.437	0.976	-0.386	0.088
4	0.456	0.972	-0.332	0.130
5	0.475	0.971	-0.281	0.171
6	0.494	0.970	-0.232	0.211
7	0.512	0.968	-0.180	0.250
8	0.531	0.962	-0.126	0.286
9	0.549	0.960	-0.075	0.322
10	0.566	0.953	-0.020	0.356
11	0.583	0.945	0.035	0.388
12	0.599	0.937	0.089	0.418
13	0.613	0.925	0.147	0.445
14	0.626	0.911	0.204	0.469
15	0.637	0.896	0.262	0.492
16	0.648	0.881	0.318	0.512
17	0.657	0.863	0.375	0.529
18	0.665	0.848	0.429	0.546
19	0.674	0.834	0.481	0.563

20	0.684	0.823	0.530	0.580
21	0.692	0.811	0.578	0.596
22	0.700	0.800	0.625	0.611
23	0.709	0.791	0.670	0.626
24	0.717	0.781	0.715	0.639
25	0.723	0.770	0.758	0.651
26	0.729	0.758	0.801	0.661
27	0.732	0.744	0.843	0.669
28	0.734	0.730	0.884	0.675
29	0.735	0.716	0.923	0.679
30	0.735	0.700	0.961	0.681
31	0.731	0.682	0.996	0.681
32	0.727	0.693	0.955	0.679
33	0.721	0.706	0.905	0.675
34	0.715	0.718	0.855	0.670
35	0.707	0.729	0.804	0.664
36	0.698	0.739	0.754	0.657
37	0.688	0.748	0.704	0.649
38	0.677	0.757	0.653	0.640
39	0.666	0.764	0.603	0.630
40	0.654	0.771	0.553	0.621
41	0.641	0.777	0.503	0.610
42	0.628	0.783	0.452	0.600
43	0.615	0.790	0.402	0.589
44	0.603	0.797	0.352	0.579
45	0.590	0.804	0.302	0.569
46	0.575	0.809	0.251	0.558
47	0.561	0.814	0.201	0.547
48	0.547	0.820	0.151	0.536
49	0.533	0.825	0.101	0.525
50	0.518	0.830	0.050	0.514
51	0.503	0.836	0.000	0.503
52	0.488	0.841	-0.050	0.492
53	0.473	0.845	-0.101	0.481
54	0.457	0.850	-0.151	0.470
55	0.442	0.855	-0.201	0.459
56	0.427	0.861	-0.251	0.449
57	0.411	0.866	-0.302	0.438
58	0.396	0.872	-0.352	0.428
59	0.380	0.877	-0.402	0.417
60	0.363	0.881	-0.452	0.406
61	0.347	0.885	-0.503	0.395
62	0.331	0.890	-0.553	0.384
63	0.314	0.894	-0.603	0.374
64	0.297	0.899	-0.653	0.363
65	0.280	0.903	-0.704	0.352
66	0.262	0.906	-0.754	0.341
67	0.245	0.909	-0.804	0.330
68	0.228	0.913	-0.855	0.320
69	0.210	0.917	-0.905	0.309
70	0.193	0.921	-0.955	0.299
71	0.175	0.926	-1.005	0.289
72	0.158	0.930	-1.056	0.278
73	0.140	0.935	-1.106	0.268
74	0.122	0.939	-1.156	0.258
75	0.104	0.943	-1.206	0.248
76	0.086	0.948	-1.257	0.238
77	0.068	0.951	-1.307	0.228
78	0.049	0.954	-1.357	0.217
79	0.031	0.957	-1.408	0.207
80	0.012	0.960	-1.458	0.197
81	-0.007	0.964	-1.508	0.187
82	-0.025	0.967	-1.558	0.177
83	-0.044	0.970	-1.609	0.168
84	-0.063	0.973	-1.659	0.158
85	-0.083	0.975	-1.709	0.148
86	-0.102	0.978	-1.759	0.138
87	-0.121	0.981	-1.810	0.129

88	-0.140	0.985	-1.860	0.119
89	-0.159	0.989	-1.910	0.110
90	-0.179	0.991	-1.960	0.100
91	-0.199	0.993	-2.011	0.091
92	-0.218	0.995	-2.061	0.081
93	-0.238	0.996	-2.111	0.072
94	-0.258	0.997	-2.162	0.063
95	-0.278	0.998	-2.212	0.053
96	-0.298	0.999	-2.262	0.044
97	-0.318	0.999	-2.312	0.035
98	-0.338	1.000	-2.363	0.026
99	-0.358	1.000	-2.413	0.017
100	-0.378	1.000	-2.463	0.009
101	-0.398	0.000	-2.513	0.000

No.	CorrectChance	CorrectQuantity	CorrectLocation	ErrorLocation	ErrorQuantity
1	0.500	0.199	0.000	0.000	0.301
2	0.500	0.195	0.014	0.000	0.291
3	0.500	0.191	0.027	0.001	0.281
4	0.500	0.187	0.041	0.001	0.271
5	0.500	0.183	0.054	0.002	0.261
6	0.500	0.179	0.068	0.002	0.251
7	0.500	0.175	0.081	0.003	0.241
8	0.500	0.171	0.094	0.004	0.231
9	0.500	0.167	0.107	0.005	0.221
10	0.500	0.163	0.120	0.006	0.211
11	0.500	0.159	0.132	0.008	0.201
12	0.500	0.155	0.144	0.010	0.191
13	0.500	0.151	0.155	0.013	0.181
14	0.500	0.147	0.166	0.016	0.171
15	0.500	0.143	0.175	0.020	0.161
16	0.500	0.139	0.185	0.025	0.151
17	0.500	0.135	0.193	0.031	0.141
18	0.500	0.131	0.201	0.036	0.131
19	0.500	0.127	0.210	0.042	0.121
20	0.500	0.123	0.219	0.047	0.111
21	0.500	0.119	0.227	0.053	0.101
22	0.500	0.115	0.235	0.059	0.091
23	0.500	0.111	0.243	0.064	0.081
24	0.500	0.107	0.251	0.071	0.071
25	0.500	0.103	0.258	0.077	0.061
26	0.500	0.099	0.265	0.085	0.051
27	0.500	0.095	0.271	0.093	0.041
28	0.500	0.092	0.276	0.102	0.031
29	0.500	0.088	0.280	0.111	0.021
30	0.500	0.084	0.284	0.122	0.011
31	0.500	0.080	0.286	0.133	0.001
32	0.500	0.076	0.288	0.127	0.009
33	0.500	0.072	0.289	0.120	0.019
34	0.500	0.068	0.290	0.114	0.029
35	0.500	0.064	0.290	0.108	0.039
36	0.500	0.060	0.289	0.102	0.049
37	0.500	0.056	0.288	0.097	0.059
38	0.500	0.052	0.287	0.092	0.069
39	0.500	0.048	0.285	0.088	0.079
40	0.500	0.044	0.283	0.084	0.089
41	0.500	0.040	0.281	0.081	0.099
42	0.500	0.036	0.278	0.077	0.109
43	0.500	0.032	0.276	0.073	0.119
44	0.500	0.028	0.274	0.070	0.129
45	0.500	0.024	0.271	0.066	0.139
46	0.500	0.020	0.268	0.063	0.149
47	0.500	0.016	0.265	0.060	0.159
48	0.500	0.012	0.262	0.057	0.169
49	0.500	0.008	0.258	0.055	0.179
50	0.500	0.004	0.255	0.052	0.189

51	0.500	0.000	0.252	0.049	0.199
52	0.496	0.000	0.248	0.047	0.209
53	0.492	0.000	0.244	0.045	0.219
54	0.488	0.000	0.241	0.042	0.229
55	0.484	0.000	0.237	0.040	0.239
56	0.480	0.000	0.233	0.038	0.249
57	0.476	0.000	0.230	0.035	0.259
58	0.472	0.000	0.226	0.033	0.269
59	0.468	0.000	0.222	0.031	0.279
60	0.464	0.000	0.217	0.029	0.289
61	0.460	0.000	0.213	0.028	0.299
62	0.456	0.000	0.209	0.026	0.309
63	0.452	0.000	0.205	0.024	0.319
64	0.448	0.000	0.200	0.023	0.329
65	0.444	0.000	0.196	0.021	0.339
66	0.440	0.000	0.191	0.020	0.349
67	0.436	0.000	0.186	0.019	0.359
68	0.432	0.000	0.181	0.017	0.369
69	0.428	0.000	0.177	0.016	0.379
70	0.424	0.000	0.172	0.015	0.389
71	0.420	0.000	0.167	0.013	0.399
72	0.416	0.000	0.162	0.012	0.409
73	0.412	0.000	0.158	0.011	0.419
74	0.408	0.000	0.153	0.010	0.429
75	0.405	0.000	0.148	0.009	0.439
76	0.401	0.000	0.143	0.008	0.449
77	0.397	0.000	0.137	0.007	0.459
78	0.393	0.000	0.132	0.006	0.469
79	0.389	0.000	0.127	0.006	0.479
80	0.385	0.000	0.121	0.005	0.489
81	0.381	0.000	0.116	0.004	0.499
82	0.377	0.000	0.111	0.004	0.509
83	0.373	0.000	0.105	0.003	0.519
84	0.369	0.000	0.100	0.003	0.529
85	0.365	0.000	0.094	0.002	0.539
86	0.361	0.000	0.088	0.002	0.549
87	0.357	0.000	0.083	0.002	0.559
88	0.353	0.000	0.077	0.001	0.569
89	0.349	0.000	0.071	0.001	0.579
90	0.345	0.000	0.066	0.001	0.589
91	0.341	0.000	0.060	0.000	0.599
92	0.337	0.000	0.054	0.000	0.609
93	0.333	0.000	0.048	0.000	0.619
94	0.329	0.000	0.042	0.000	0.629
95	0.325	0.000	0.036	0.000	0.639
96	0.321	0.000	0.030	0.000	0.649
97	0.317	0.000	0.024	0.000	0.659
98	0.313	0.000	0.018	0.000	0.669
99	0.309	0.000	0.012	0.000	0.679
100	0.305	0.000	0.006	0.000	0.689
101	0.301	0.000	0.000	0.000	0.699

 ** : A ranked image (Tmp\$Rank_PREDICT3C_30) based on the input image was created in the working directory.

In addition, a percentile map(Tmp\$percentile_PREDICT3C_30) based on the threshold bands user specified was also created in the working directory.